№ 3 2021 +0 [61]

научно-технический журнал

Известия

ИНСТИТУТА ИНЖЕНЕРНОЙ ФИЗИКИ

ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРНОЙ ФИЗИКИ - ОФИЦИАЛЬНЫЙ ПАРТНЕР МЕЖДУНАРОДНОГО ВОЕННО-ТЕХНИЧЕСКОГО ФОРУМА «АРМИЯ-2021»

Межрегиональное общественное учреждение
“Институт инженерной физики”
(научное, образовательное и производственное учреждение)

В НОМЕРЕ

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО–ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

2 **Салько А.Е., Загарских В.И., Кузин Е.Н., Кондакова Л.В.**
Транслятор детонации с продольным каналом

6 **Захаров В.Л., Смирнов Д.В., Хаматов А.А., Широков С.Е.**
Технология диагностирования бортовой аппаратуры космических аппаратов при автономной эксплуатации

9 **Искендеров Э.Г.**
Экспериментальная установка для исследования удельной теплоты плавления льдосодержащих смесей

14 **Беркович С.Б., Бикмаев Р.Р., Котов Н.И., Махаев А.Ю., Шолохов А.В.**
Опыт создания комплекса метрологического обеспечения средств высокоточных измерений азимута

20 **Коробков А.А., Кулик М.В., Садекова А.А., Сергеев С.С., Смородин А.И.**
Математическое моделирование процесса охлаждения сжиженного метана в теплообменном аппарате, предназначенном для охлаждения криогенных продуктов перед заправкой ракеты-носителя

25 **Попов А.Г., Агеев А.В.**
О прогнозировании остаточного срока службы сосудов высокого давления на основе результатов технического диагностирования

28 **Гришакин В.Т.**
Учет одностороннего характера связи дополнительной опоры с многопролетной балкой при идентификации подвижной нагрузки

33 **Алаторцев А.И., Чиграй А.Г., Фуров А.Н.**
Методический подход к оценке сохраняемости космических летательных аппаратов при воздействии на них тел природного происхождения

36 **Аксёнов А.В., Обыночный И.А., Турков С.С.**
Метод измерительного контроля цепей подключения непроверяемых в эксплуатации приборов, обеспечивающий повышение надежности в специальных комплексах военного назначения

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

39 **Калюжный А.А., Аль Рубеи Мохаммед, Поздняков А.Д.**
Восстановление периодического сигнала по заданному числу точек когерентного стробирования

44 **Зеленевский В.В., Черноусов М.С., Зеленевский Ю.В., Наконечный А.Б.**
Эффективность каскадного кодирования данных с внутренними ортогональными последовательностями

47 **Куприянов А.И.**
Прицельная шумовая помеха радиосистемам с широкополосными сигналами

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

51 **Фролов П.В., Медведева С.А., Мазин А.В., Вершинин Е.В.**
Применение многоуровневого комбинированного анализа сетевых пакетов в системах обнаружения вторжений

55 **Бутрина Е.П., Олейников В.П.**
Защищенность объекта: структуры событий и сценарный подход

61 **Захаров В.Л., Смирнов Д.В., Казаков Р.Р.**
Оптимизация состава орбитальной группировки космических аппаратов двойного назначения

65 **Грибунин В.Г., Гришаненко Р.Л., Лабазников А.П., Тимонов А.А.**
Безопасность систем машинного обучения. Защищаемые активы, уязвимости, модель нарушителя и угроз, таксономия атак

72 **Волков Г.Г.**
О контроле электрон-ядерно-спиновой динамики в NV-центрах

81 **Умников Е.В., Грачёв Д.В.**
Структура системы обеспечения информационной безопасности при имитационном моделировании робототехнических комплексов

СОВРЕМЕННАЯ МЕДИЦИНА И ФАРМАЦЕВТИКА

87 **Ермаков А.М., Ермакова О.Н., Царькова Е.А., Царьков А.Н.**
Тамерон – как препарат для профилактики и лечения нейропсихологических последствий стресса у военнослужащих

91 **Ермаков А.М., Лазукин А.В., Афанасьева В.А.**
Разработка генератора низкотемпературной газовой плазмы для медицинского применения и перспектива его использования как эффективного стерилизатора и активатора ранозаживления в полевых и стационарных условиях в медицинской службе армии РФ

ИННОВАЦИОННЫЕ ПРОЕКТЫ

94 **Карулин В.П., Сытняк Ю.А., Аляева Ю.В.**
К вопросу об определении содержания и структуры научных компетенций государственных научных центров Российской Федерации

НАУКОМЕТРИЯ

100 **Емелин Н.М.**
Показатели результативности деятельности государственных научных центров как элементы присвоения (подтверждения) их статуса

103 **AUTHORS**

105 **ЭТИКА НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ**

106 **ТРЕБОВАНИЯ К АВТОРАМ СТАТЕЙ**

Научно-технический журнал

ИЗВЕСТИЯ Института инженерной физики

№3 (61) 2021

Издается с апреля 2006 г. Выходит ежеквартально

ISSN 2073-8110

Включен в «Перечень ВАК» по научным специальностям:
05.11.16. Информационно-измерительные и управляющие системы
05.12.13. Системы, сети и устройства телекоммуникаций
05.13.01. Системный анализ, управление и обработка информации
05.13.19. Методы и системы защиты информации, информационная безопасность

Главный редактор, председатель редакционного совета и редакционной коллегии

Алексей Николаевич Царьков
Президент – Председатель Правления МОУ «ИИФ», заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор

Редакционный совет

Геннадий Иванович Азаров
главный научный сотрудник ФГУП «16 ЦНИИИ МО РФ» заслуженный деятель науки РФ, заслуженный изобретатель РФ, лауреат Государственной премии РФ, лауреат премии Правительства РФ, доктор технических наук, профессор

Сергей Владимирович Дворянкин
начальник департамента Государственной корпорации «РОСТЕХ» ОАО КРЭТ, доктор технических наук, профессор

Николай Михайлович Емелин
главный научный сотрудник ФГБНУ «Госметодцентр», заслуженный деятель науки и техники РСФСР, доктор технических наук, профессор

Валерий Иванович Николаев
научный референт ОАО «Концерн «Созвездие», лауреат Государственной премии СССР, лауреат премии Правительства РФ, доктор технических наук, профессор

Владимир Георгиевич Редько
заместитель руководителя Центра оптико-нейронных технологий НИИ системных исследований РАН, доктор физико-математических наук

Юрий Александрович Романенко
старший научный сотрудник филиала ВА РВСН им. Петра Великого (г. Серпухов) заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор

Александр Викторович Синьговский
старший научный сотрудник Европейского центра ядерных исследований (CERN), Adjunct Assistant Professor Университета Миннесоты (США), кандидат физико-математических наук

Анатолий Васильевич Тодосийчук
главный советник аппарата Комитета ГД ФС РФ по образованию и науке, почетный работник науки и техники РФ, доктор экономических наук, профессор

Александр Павлович Царёв
заведующий кафедрой компьютерных архитектур и телекоммуникаций Западно-поморского технологического университета (Польша), доктор технических наук, профессор

Игорь Анатольевич Шеремет
заместитель директора Российского фонда фундаментальных исследований по науке, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор

научно-технический журнал
Известия
ИНСТИТУТА ИНЖЕНЕРНОЙ ФИЗИКИ
№ 3 (61)
2021

Редакционная коллегия

Олег Николаевич Андрух
почетный работник науки и техники РФ, кандидат технических наук, доцент

Борис Фёдорович Безродный
доктор технических наук, профессор

Сергей Борисович Беркович
почетный геодезист РФ
доктор технических наук, профессор

Владимир Эрнестович Бородай
лауреат Государственной премии СССР, кандидат технических наук, старший научный сотрудник

Игорь Александрович Бугаков
заслуженный изобретатель РФ, почетный работник науки и техники РФ, доктор технических наук, профессор

Вадим Геннадьевич Грибунин
почетный работник науки и техники РФ, доктор технических наук

Сергей Григорьевич Данилюк
доктор технических наук, профессор

Владимир Владимирович Зеленевский
почетный работник науки и техники РФ, доктор технических наук, профессор

Николай Николаевич Казаков
член Союза писателей России
выпускающий редактор

Олег Павлович Кузнецов
кандидат технических наук, доцент

Александр Ильич Куприянов
доктор технических наук, профессор

Анатолий Викторович Мазин
доктор технических наук, профессор

Алексей Сергеевич Марков
доктор технических наук, старший научный сотрудник

Дмитрий Геннадьевич Митрофанов
заслуженный изобретатель РФ, доктор технических наук, профессор

Роман Леонидович Мусатов
кандидат технических наук
заместитель главного редактора

Игорь Николаевич Оков
доктор технических наук, профессор

Владимир Петрович Пашинцев
заслуженный работник высшей школы РФ, доктор технических наук, профессор

Дмитрий Вячеславович Смирнов
почетный работник науки и техники РФ, доктор технических наук, доцент

Сергей Владимирович Смуров
почетный работник науки и техники РФ, доктор технических наук, профессор

Валерий Николаевич Умников
доктор технических наук, профессор

Владимир Анатольевич Цимбал
заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор

Сергей Николаевич Шиманов
почетный работник высшего профессионального образования РФ, почетный радист РФ, доктор технических наук, профессор

Владимир Анатольевич Грачёв

Советник Президента МОУ «ИИФ»
почётный работник высшего профессионального образования РФ
кандидат педагогических наук

Уважаемые коллеги!
Дорогие друзья!

Институт инженерной физики традиционно станет официальным партнером и активным участником Международного военно-технического форума «Армия», который пройдет в период с 22 по 28 августа в Конгрессно-выставочном центре «Патриот» в городе Кубинка Московской области. Мы гордимся тем, что наш Институт с первого форума «Армия», который был организован Министерством обороны в 2015 году, выступает официальным партнером этого грандиозного, рекордного по масштабу экспозиции, насыщенности научно-деловой и демонстрационной программ, составу участников и значимости для нашей страны военно-технического форума. Это уникальная выставочная площадка для демонстрации лучших достижений научно-технической мысли, воплощенных в современных и перспективных образцах интеллектуального оружия, вооружения, военной и специальной техники, уникальных технологий двойного и гражданского назначения.

В этом году, в соответствии с одной из важнейшей идей форума показать отечественные разработки двойного назначения, Институт инженерной физики представит Технопарк в сфере высоких технологий «Техноинноватика», который успешно реализуется при поддержке администрации городского округа Серпухов и Правительства Московской области. Это новый этап в сфере развития высоких технологий – «Научно-технологический и фармацевтический производственный комплекс», в котором будут развиваться фармацевтические, информационно-коммуникационные, оборонные технологии, а также технологии обеспечения безопасности и работоспособности человека. «Техноинноватика», созданная МОУ «ИИФ», – второй Технопарк в Московской области. Он привлечет инвестиции, создаст новые рабочие места, будет способствовать экономическому росту региона. На форуме наш Институт представит целый ряд инновационных разработок, среди которых уникальный лекарственный препарат нового поколения Тамерон, единый комплекс астрономо-геодезического, навигационного и геоинформационного обеспечения, экипировка и снаряжение с автономной системой электрообогрева, автономные установки пожаротушения «Огнеборец» – исключительно российский продукт, не имеющий аналогов в мире.

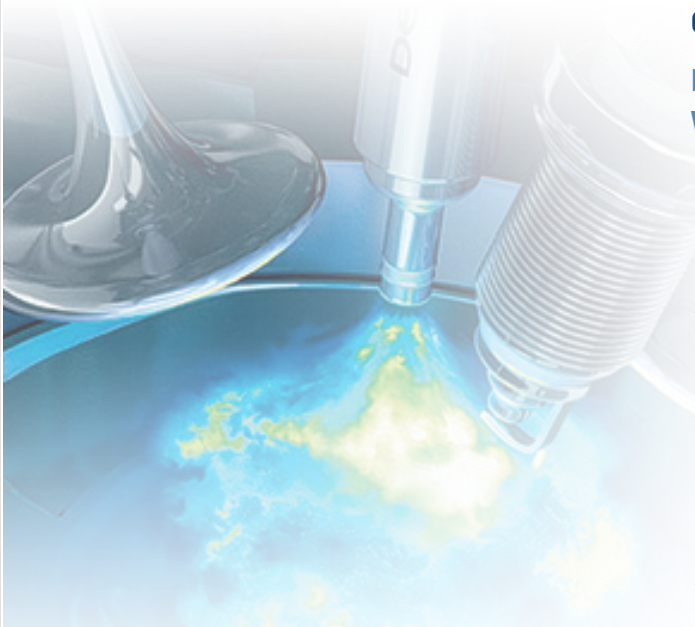
Для Института участие в Международном военно-техническом форуме «Армия-2021» – возможность представить свои инновационные разработки руководителям силовых структур и ведомств, коллегам и партнерам, пообщаться с ведущими специалистами военных и гражданских отраслей, обменяться опытом и мнениями по перспективным конструкторским решениям, новейшим технологиям и их практическому применению, установить новые контакты, обрести новых партнеров и заказчиков.

Приглашаем всех посетить экспозиционный стенд МОУ «Институт инженерной физики» с 23 августа для специалистов и с 26 по 28 августа для всех желающих в павильоне С, стенд 3С3. Будем рады видеть вас на Международном военно-техническом форуме «Армия-2021»!

УДК 629.78

ТРАНСЛЯТОР ДЕТОНАЦИИ С ПРОДОЛЬНЫМ КАНАЛОМ

DETONATION TRANSLATOR WITH LONGITUDINAL CHANNEL



Владимир Ильич Загарских
кандидат технических наук, доцент
старший научный сотрудник
ВА РВСН имени Петра Великого
Адрес: 143900, Московская обл.,
г. Балашиха, ул. Карбышева, д. 8
Тел.: 8 (903) 254-68-56
E-mail: zagarskihv@rambler.ru

Евгений Николаевич Кузин
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
старший научный сотрудник
ВА РВСН имени Петра Великого
Адрес: 143900, Московская обл.,
г. Балашиха, ул. Карбышева, д. 8
Тел.: 8 (916) 105-48-25
E-mail: varvsn@mil.ru

Любовь Викторовна Кондакова
младший научный сотрудник
ВА РВСН имени Петра Великого
Адрес: 143900, Московская обл.,
г. Балашиха, ул. Карбышева, д. 8
Тел.: 8 (903) 149-55-89
E-mail: arvsn@mil.ru

Андрей Евгеньевич Салько
доктор технических наук, профессор
заместитель генерального директора
по научно-технической политике и
межструктурным коммуникациям
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7 (985) 923-42-09

Аннотация
В статье рассмотрен принцип построения удлиненного заряда с центральным каналом, который может найти применение в качестве неразрушаемого транслятора детонационных команд с приемлемыми массовыми и взрывчато-техническими характеристиками.
Ключевые слова: удлиненный заряд с продольным каналом; критические диаметр и толщина детонации; критическое давление инициирования.

Summary
The article discusses the principle of constructing an elongated charge with a central channel, which can be used as an indestructible translator of detonation commands with acceptable mass and explosive-technical characteristics.
Keywords: elongated charge with a longitudinal channel; critical diameter and thickness of detonation; critical initiation pressure.

Современные и перспективные системы разведения детонационных команд состоят из ряда функциональных элементов, к числу которых относятся заряды-трансляторы, предназначенные для передачи команд к исполнительным пиромеханизмам. Такие заряды должны отвечать комплексу требований по надежности действия, массово-габаритным и взрывчато-техническим характеристикам. Иметь минимальную массу снаряжения и всего заряда, стабильно возбуждаться от штатных средств инициирования и устойчиво детонировать в сочетании с минимальным побочным действием и обеспечивать гарантированное инициирование в снаряжении исполнительных пиромеханизмов [1,2].

В настоящее время в изделиях ракетно-космической техники нашли применения не разрушаемые трансляторы детонации – «Транеры» [3]. Такие трансляторы состоят из удлиненного заряда эластичного взрывчатого вещества (ВВ), заключенного в комбинированную оболочку (металл и синтетическое волокно). Сердцевина заряда выполнена из ВВ с малым критическим диаметром детонации, равным примерно

0,2 мм. В целях повышения восприимчивости к инициирующему импульсу и повышения инициирующей способности по торцам заряда размещены заряды усилители. По данным, представленным в [2], масса такого транслятора составляет 20-40 г/м без учета массы наконечников. Основные характеристики разработанных зарядов-трансляторов типа «Транер» находятся на пределе возможности гарантированной передачи детонационного импульса вследствие того, что дальнейшее уменьшение диаметра снаряжения неизбежно ведет к срыву детонации.

В качестве перспективы совершенствования массогабаритных характеристик зарядов-трансляторов при сохранении их детонационных характеристик можно рассмотреть возможность применения удлиненных зарядов с продольным каналом (УЗПК) [4,5]. В отличие от «Транера» УЗПК состоит из тонкой высокоплотной взрывчатой сердцевины, заключенной между внешней и внутренней металлическими оболочками. Принципиальная схема такого заряда представлена на *рисунке 1*. Проектирование подобного типа зарядов, с учетом предъявляемых требований, представляет достаточно сложную задачу. Прежде всего, необходимо определить материалы, из которых могут быть изготовлены оболочки и снаряжение, их геометрические характеристики (толщины стенок), инициирующая способность и чувствительность к ударноволновому импульсу.

Из физики взрыва [4] известно, что расположение заряда ВВ между двумя оболочками из плотных и малосжимаемых материалов приводит к уменьшению критической толщины детонации. При этом основной характеристикой материалов, из которых могут быть выполнены оболочки, определяющей степень влияния на величину критической толщины снаряжения, служит ее импеданс, произведение плотности материала на скорость звука в нем. В качестве таких материалов, имеющих высокий импеданс, наиболее приемлемыми являются медь и сталь. На практике эти материалы используются для изготовления удлиненных зарядов методом волочения, что наиболее применимо и для изготовления УЗПК в целях достижения высокой плотности снаряжения и обеспечения требуемых геометрических характеристик зарядов.

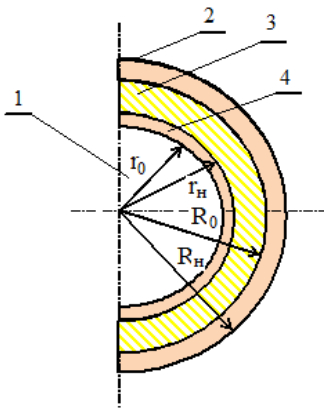


Рис. 1. Удлиненный заряд с продольным каналом:
1 – канал; 2 – внутренняя оболочка; 3 – взрывчатая сердцевина; 4 – наружная оболочка

Сердцевину таких удлиненных зарядов целесообразно изготавливать из кристаллических высокобризантных ВВ – гексогена либо октогена, хорошо уплотняющихся при волочении и имеющих малый критический диаметр детонации. Поскольку снаряжение УЗПК расположено между двух ограничивающих поверхностей, то в качестве меры детонационной способности заряда следует принять критическую толщину детонации. Известно, что при заключении заряда ВВ в оболочку из материала с импедансом больше, чем импеданс ВВ, критический диаметр детонации будет уменьшаться по меньшей мере в два раза [4]. Поскольку в УЗПК заряд ВВ ограничен двумя пластинами, критическая толщина детонации по сравнению с таким же зарядом без ограничений, по данным, приведенным в [4], уменьшается в 2-4 раза. Конечно, это будет справедливо лишь при условии, что оболочки имеют толщину, исключающую проникновение волн разрежения в зону химических реакций. В противном случае волны разрежения будут перехватывать зону химических реакций, что неизбежно приведет к срыву детонации. Кроме того, толщина стенки наружной оболочки должна обеспечивать капсюляцию продуктов детонации, исключать возможность их прорыва и формирования осколочного поля.

Для расчета не разрушаемой толщины стенки монолитной наружной оболочки достаточно воспользоваться уравнением затухания ударной волны, полученным по результатам обработки экспериментальных данных при разработке удлиненных зарядов (УЗ) в не разрушаемых оболочках [6]

$$p_{вн}^{кр} = p_x \exp\left[-a\left(\frac{\delta_{кр}}{r_0}\right)^b\right], \qquad (1)$$

где r_0 – радиус снаряжения УЗ;

$p_{вн}^{кр}$ – критическое давление на внешней поверхности оболочки;

p_x – давление на контактной поверхности «ВВ – оболочка»;

$\delta_{кр}$ – критическая (не разрушаемая) толщина оболочки;

a = 0,665, $в$ = 0,615 – эмпирические коэффициенты.

Для зарядов в медных оболочках значение $p_{вн}^{кр}$ составляет 1,96 ГПа, для зарядов в алюминиевых оболочках – 1,77 ГПа (при подрыве зарядов в воздушной среде). Эмпирические коэффициенты, приведенные в уравнение 1, получены после обработки массива экспериментальных данных и справедливы только для металлических оболочек (выполненных из меди, алюминия, стали и свинца).

Заменив в уравнении 1 радиус r_0 на толщину $\delta_{сн}=R_0-r_н$ снаряжения УЗПК, несложно рассчитать толщину неразрушаемуй внешней оболочки по уравнению

$$\delta_{кр}=\delta_{сн}\left(-ln\frac{p_{вн}^{кр}}{p_x}\times\frac{1}{0{,}665}\right)^{\frac{1}{0{,}615}}. \qquad (2)$$

Критическая толщина детонации свободного заряда из гексогена с плотностью, равной 1,65 г/см^3, по данным, представленным в [4], составляет около 0,45 мм. При двухстороннем ограничении подобного заряда критическая толщина детонации будет составлять доли миллиметра. Поэтому при расчетах критической толщины внешней оболочки толщину сердцевины УЗПК вполне можно ограничить 0,1-0,15 мм. Также следует учитывать, что при детонации снаряжения одна часть энергии взрыва будет воздействовать на внешнюю оболочку, а другая – на внутреннюю. Внутренняя оболочка будет подвержена всестороннему обжатию, которое будет продолжаться до схлопывания канала (*рисунок 2*).

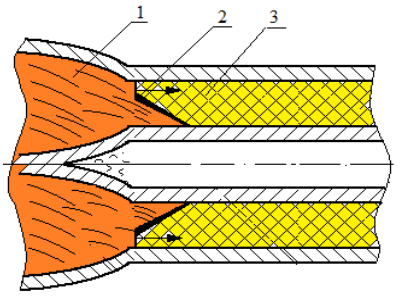


Рис. 2. Схема протекания детонации в канальном заряде:
1 – продукты детонации; 2 – фронт детонационной волны;
3 – взрывчатая сердцевина УЗПК

Оценить доли каждой из этих частей энергии в прямой постановке не представляется возможным. Поэтому в первом приближении полезно рассчитать критическую толщину внешней оболочки при условии, что вся энергия взрыва расходуется на ее разрушение. Например, при толщине сердцевины в 0,1 мм из гексогена плотностью 1,65 г/см^3 критическая толщина $\delta_{кр}$ медной оболочки составит 0,8 мм, а критическая толщина оболочки из алюминия – 1,0 мм. В реальных условиях детонации канального заряда критическая толщина оболочек будет несколько меньше, вследствие увеличения внутреннего объема заряда при расширении продуктов детонации.

Несложно определить и влияние волн разрежения на закономерности протекания устойчивой детонации в снаряжении УЗПК. Достаточно при известных толщинах оболочек и материалах, из которых они изготовлены, рассчитать время прихода волн разрежения в зону химических реакций. Далее, варьируя толщиной оболочек, а также их возможной комбинацией, можно рассчитать допустимые значения их толщин.

Чувствительность канальных зарядов в медных оболочках с гексогеновым снаряжением к ударно-волновым импульсам при торцевом нагружении, как было показано в [7], зависит от толщины и материала наружной и внутренней оболочек и находится на уровне 0,8-4,5 ГПа, что практически равно критическим параметрам инициирования детонации в удлиненных зарядах со сплошной сердцевиной диаметром менее 0,5 мм.

В *таблице 1* приведены экспериментальные данные по определению скорости детонации УЗПК. Из этих данных следует, что УЗПК всех исследованных калибров устойчиво детонируют. А инициирующая способность УЗПК, исследованная экспериментально, по отношению к уплотненным зарядам высокобризантных ВВ находится на уровне штатных средств инициирования.

В заключение отметим, что применение уд-

Таблица 1

Экспериментальные значения скорости детонации УЗПК

Калибр заряда	Материал оболочек	Плотность снаряжения, $\rho_в$, г/см^3	Масса снаряжения, ω, г/м	Скорость детонации, D, м/с
УЗПК-1,7	медь	1,66	0,47	8100
УЗПК-2,1	медь	1,67	0,60	8200
УЗПК-2,8	медь	1,63	1,21	8300
УЗПК-1,7	алюминий	1,56	0,47	7400
УЗПК-2,1	алюминий	1,55	0,65	7860
УЗПК-2,8	алюминий	1,55	1,10	8000

линенных зарядов с продольным каналом в системах разведения детонационных команд является перспективным и может составить альтернативу существующим трансляторам. Дальнейшая разработка и применение УЗПК в перспективных пиромеханизмах приведет к снижению их массово-габаритных характеристик.

Литература

1. Ефанов В.В., Горовцов В.В. Конструкция и расчет систем и устройств разделения космических аппаратов: учеб. пособие. М.: Изд-во МАИ, 2015. 112 с.
2. Ефанов В.В., Горовцов В.В., Котомин А.А., Душенок С.А. Современные системы детонационной автоматики космических аппаратов. Проблемы, решения, основы проектирования // Фундаментальные и прикладные проблемы космонавтики, 2002. № 8. С.12-21.
3. Ефанов В.В., Горовцов В.В., Кузин Е.Н., Душенок С.А., и др. Неразрушаемый транслятор детонации: Патент РФ на изобретение RU 2633848 C1. Опубликовано: 18.10.2017. Бюл. №29.
4. Физика взрыва: под ред. Л.П. Орленко. Изд. 3-е, переработанное. В 2 т. Т. 1. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. 832 с.
5. Иванов С.В., Загарских В.И, Кузин Е.Н. Линейный заряд-транслятор детонационных команд кольцевого типа: Патент РФ на изобретение RU 2134254 C1. Опубликовано: 10.08.99. Бюл. №22.
6. Загарских В.И., Кузин Е.Н., Гладышев А.И. Детонационные устройства изделий ракетно-космической техники: Монография. М.: ВА РВСН им. Петра Великого, 2018. 173 с.
7. Смуров С.В., Салько А.Е., Загарских В.И., Кузин Е.Н. Некоторые аспекты инициирования снаряжения в трансляторах детонационных команд // Известия Института инженерной физики, 2021. №2(60). С.35-38.

УДК 629.7

ТЕХНОЛОГИЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПРИ АВТОНОМНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

TECHNOLOGY FOR DIAGNOSING ON-BOARD SPACECRAFT EQUIPMENT DURING AUTONOMOUS OPERATION

Владимир Леонидович Захаров
доктор военных наук, профессор
действительный член АВН
профессор кафедры
ФГБОУ ВО МАИ (НИУ)
Адрес: 125993, Москва,
Волоколамское шоссе, д. 4
Тел.: +7 (905) 566-17-94
E-mail: varahas@yandex.ru

Дмитрий Вячеславович Смирнов
почетный работник науки и техники РФ
доктор технических наук, доцент
действительный член АИН
профессор кафедры
ФГБОУ ВО МАИ (НИУ)
Первый Вице-президент Института –
заместитель Председателя Правления Института
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7 (4967) 35-31-93
E-mail: dv_smr@iifmail.ru

Андрей Анатольевич Хаматов
кандидат технических наук
преподаватель кафедры
«Бортовых информационных и измерительных комплексов»
ВКА имени А.Ф. Можайского
Адрес: 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13
Тел.: 8 (911) 256-89-82
E-mail: hamatoff2010@yandex.ru

Сергей Евгеньевич Широков
начальник лаборатории
кафедры «Бортовых информационных и измерительных комплексов»
ВКА имени А.Ф. Можайского
Адрес: 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13
Тел.: +7 (962) 689-72-03
E-mail: shirokov_sergei@mail.ru

Аннотация
В статье обоснована актуальность достоверного диагностирования бортовой аппаратуры космических аппаратов при автономной эксплуатации. Рассмотрен способ диагностирования на основе конечного автомата и нечеткой логики. В общем виде описана технология диагностирования бортовой аппаратуры космических аппаратов при автономной эксплуатации.
Ключевые слова: диагностирование, нечеткая логика, конечный автомат, достоверность диагностирования.

Summary
The article substantiates the relevance of reliable diagnostics of on-board equipment of spacecraft during autonomous operation. A diagnostic method based on a finite automaton and fuzzy logic is considered. The technology of diagnosing of spacecraft on-board equipment during autonomous operation is described.
Keywords: diagnosing, fuzzy logik, state machine, reliability of diagnosis.

Введение

Диагностирование бортовой аппаратуры (БА) космических аппаратов (КА) значительное время проводится при автономной эксплуатации. КА – это сложные динамические системы. Очень остро при их диагностировании стоит проблема достоверности принятия решения. Невысокое качество диагностирования часто приводит к ошибочным решениям на восстановление работоспособности БА КА или к работе неисправной БА КА. В некоторых случаях может быть причиной полного выхода из строя КА [1,2].

При этом достоверность диагностирования сильно влияет на автономность КА. Требования к автономной эксплуатации КА имеют тенденцию к росту. Прежде всего, это обусловлено следующими обстоятельствами [1,2]:

- насыщение процессов управления КА информацией;
- возрастающая сложность решаемых КА задач;
- увеличение видов и количества автономно эксплуатируемых КА;

Используемые способы диагностирования БА КА не всегда могут обеспечить требования автономной эксплуатации, так как основаны на объемном информационном обмене с наземными службами [1,2].

Использование дискретных управляющих воздействий X при диагностировании БА КА (с учётом времени их выполнения), анализ по значениям выходных диагностических признаков (ДП) Y множества технических состояний Q, а также и конечность множеств X, Y, Q позволяют применять конечный автомат в качестве математической модели диагностирования БА КА [3].

Близость к границам допусков технических диагнозов (ТД) БА КА и соответствующие им значения ДП можно оценить лингвистически. Данное допущение позволяет использовать для диагностирования БА КА при автономной эксплуатации нечеткую логики. Аппарат нечеткой логики обладает важным преимуществом: возможность формализации знаний и реализации подходов к принятию решения используемых человеком [4,5]. Это особенно необходимо для диагностирования КА при автономной эксплуатации.

Следовательно, технология диагностирования БА КА при автономной эксплуатации может быть основана на применении конечного автомата и нечеткой логики.

Способ диагностирования на основе нечеткой логики

Диагностирование посредством нечеткой логики позволяет оценить достоверность следующим образом [4,5]:

$$d = max\mu_{тд} \quad (1)$$

где d – достоверность диагностирования;
$\mu_{тд}$ – функция принадлежности.

ТД определяется с помощью диагностирования в рабочем и тестовом режимах, когда достоверность диагностирования d достигает значения 0,95 и выше.

Способы диагностирования БА КА на основе нечеткой логики проиллюстрированы на *рисунке 1*.

В данном примере множество нечетких правил включает три правила: а), б) и в). Слева показано, что некоторым значениям ДП y_1 и y_2 присваиваются значения функций принадлежности μ_1, μ_2 (этап фаззификации). Далее происходит сравнение значений их функций принадлежности (этап агрегирования подусловий). Из данных значений функций принадлежности в правой части рисунка выявляется минимальное, которое определяет степень истинности правила (этап активизации подзаключений). Последняя строка рисунка г) показывает просуммированные степени истинности всех трех правил (этап аккумулирования заключений), и четкое значение одного из ТД ($y_{т.д}$=0,4), полученное в результате этапа дефаззификации.

Можно сделать вывод, что близость значений ДП к границам допусков ТД влияет на численное увеличение значение показателя, связанного с определенным ТД.

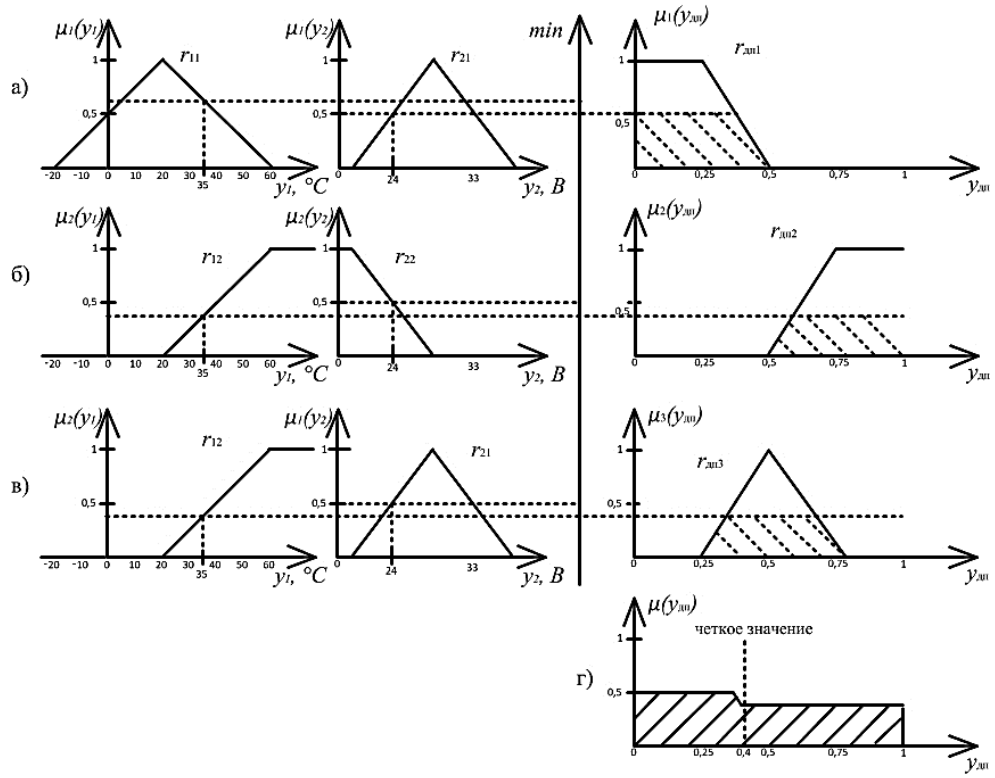


Рис. 1. Способы диагностирования БА КА на основе нечеткой логики

Технология диагностирования бортовой аппаратуры космических аппаратов

В технологию диагностирования БА КА при автономной эксплуатации стоит включить следующие этапы:

а) Построение математической модели БА КА:

1) Предварительный анализ исходных данных.

2) Построение конечного автомата¸ описывающего функционирование БА КА.

3) Определение весов кратчайших путей между режимами работы БА КА.

4) Анализ множества допустимых технических диагнозов в режимах функционирования.

5) Синтез множества нечетких правил.

б) Процесс диагностирования:

1) Численное измерение значений ДП.

2) Решение о техническом диагнозе с помощью нечеткой логики:

2.1) Фаззификация значений ДП.

2.2) Агрегирование подусловий.

2.3) Активизация подзаключений.

2.4) Аккумулирование заключений.

2.5) Деффазификация значения технических диагнозов.

3) Вычисление достоверности технических диагнозов.

4) Вывод о необходимости тестового диагностирования.

5) Построение оптимальной программы тестового диагностирования.

6) Тестовое диагностирование.

7) Принятие решения о техническом диагнозе или вызове наземных служб.

Синтез программы диагностирования на борту КА происходит в масштабе реального времени. На состав и длительность программы влияют:

- экспертные мнения и априорные данные о возможных технических диагнозах в режимах функционирования;
- режим функционирования;
- веса кратчайших путей между режимами функционирования;
- технические диагнозы на предыдущих этапах диагностирования.

Заключение

Применение указанной технологии может позволить увеличить достоверность диагностирования БА КА при автономной эксплуатации и снизить объемы телеметрической информации (ТМИ) передаваемой с КА для наземного анализа. Совершенствование элементов технологии диагностирования БА КА при автономной эксплуатации может осуществляться по следующим направлениям:

а) структура конечно-автоматной модели БА КА;

б) множество лингвистических переменных, характеризующих показания ДП на предмет соответствия допускам;

в) множество нечетких переменных, характеризующих ТД;

г) множество термов лингвистических переменных;

д) множество используемых функций принадлежности;

е) алгоритм диагностирования на основе нечеткой логики;

ж) множество нечетких правили способы их задания;

з) способы фаззификации значений ДП в нечетких правилах;

и) способы агрегирования подусловий в нечетких правилах;

к) способы активизации подзаключений в нечетких правилах;

л) способы аккумулирования заключений нечетких правил;

м) способы деффазификации в нечетких правилах;

н) алгоритм построения тестовых программ диагностирования;

о) критерии оптимизации тестовых программ.

Литература

1. Управление космическими аппаратами и средствами наземного комплекса управления: учебник / Ю.С. Мануйлов, В.Н. Калинин, В.С. Гончаревский и др. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2010. 346 с.

2. Ефимов В.В. Нейроподобные сети в бортовых информационно-управляющих комплексах летательных аппаратов. СПб.: ВИККА им. А.Ф. Можайского, 1996. 113 с.

3. Козырев Г.И., Лоскутов А.И. Основы испытаний бортовых радиоэлектронных систем: учеб. пособие. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2013. 158 с.

4. Адаменко А.Н. Системы искусственного интеллекта: учеб. пос. / Адаменко А.Н., Войцеховский С.В., Компаниец Р.И. и др. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2013. 291 с.

5. Полянский В.И. Нечеткие множества в моделях и методах диагностирования сложных технических систем: монография. М.: Полиграфсервис, 2010. 242 с.

УДК 538.91: 538.953

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОТЫ ПЛАВЛЕНИЯ ЛЬДОСОДЕРЖАЩИХ СМЕСЕЙ

EXPERIMENTAL SETUP FOR STUDYING THE SPECIFIC HEAT OF MELTING OF ICE–CONTAINING MIXTURES

Эльдар Гаджимурадович Искендеров
кандидат химических наук
старший научный сотрудник
Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики –
филиал Объединенного института высоких температур РАН
Адрес: 367030, Республика Дагестан, г. Махачкала, проспект И.Шамиля, д. 39а
Тел.: +7 (988) 308-06-04
E-mail: elisk13@mail.ru

Аннотация

Разработана экспериментальная установка для проведения исследований составов, применяемых в аккумуляторах холода, с автоматической регистрацией получаемых данных. Расчет результата измерения выполняется экстраполяционным методом, позволяющим наиболее точно рассчитать изменение температуры Δt, вне зависимости от теплообмена между калориметром и окружающей средой. Отличительной особенностью данной установки является использование контейнера для образца, позволяющего проводить многократные исследования одного образца, последовательный интерфейс, минимальные требования к аппаратному обеспечению, простота в обслуживании, открытое программное обеспечение. Создана программа для персонального компьютера, автоматически рассчитывающая удельную теплоту плавления льда и льдосодержащих смесей, разработанная на языке программирования Java. Данная программа представляет собой JavaDesktop-приложение с интуитивно понятным графическим интерфейсом. Реализован экспорт результатов расчета в текстовой и графический файл.

Ключевые слова: аккумулятор холода, калориметр, лед, измерение температуры, фазовый переход, энтальпия плавления, обработка данных, программное обеспечение.

Summary

An experimental setup has been developed for researching the compositions used in cold storage batteries, with automatic recording of the data obtained. The calculation of the measurement result is performed by the extrapolation method, which allows the most accurate calculation of the temperature change Δt, regardless of the heat transfer between the calorimeter and the environment. A distinctive feature of this installation is the use of a container for a sample, which allows multiple studies of one sample, a serial interface, minimum hardware requirements, ease of maintenance, open software. A program for a personal computer has been created that automatically calculates the specific heat of melting of ice and ice-containing mixtures, developed in the Java programming language. This program is a JavaDesktop application with an intuitive graphical interface. Export of calculation results to text and graphic files has been implemented.

Keywords: cold accumulator, calorimeter, ice, temperature measurement, phase transition, melting enthalpy, data processing, software.

Введение

С каждым годом растет использование аккумуляторов холода в различных областях деятельности человека: медицинская отрасль, воздушные кондиционеры, изотермические и холодильные камеры, сумки-холодильники. В настоящее время отсутствие недорогого доступного оборудования и программного обеспечения к нему очень сильно затрудняет исследование новых энергоемких составов для аккумуляторов холода, способных поддерживать низкую температуру продолжительное время [1,2].

На данный момент исследования энтальпии плавления составов со льдом и льдосодержащими смесями в основном заключаются в получении данных из охлаждаемой среды с плавя-

щимся в ней образцом, с последующим расчетом массы образца взвешиванием общей массы жидкости калориметра до проведения эксперимента и после. Таким образом, в дальнейшем для повторных исследований использование образца невозможно, учитывая, что каждый образец необходимо исследовать несколько раз из-за аномальных свойств воды [3-5]. Существуют также и дорогостоящие методы исследования, использующие дифференциально сканирующие калориметры, которые сложны в эксплуатации и требуют определенных условий при работе.

Целью работы являлось создание надежной, недорогой и простой в обслуживании установки для исследования удельной теплоты плавления льдосодержащих смесей (УТПЛ) с интуитивно понятным программным универсальным интерфейсом «Энплис 1.0». Основными отличиями данной установки от схожих аналогов является использование контейнера с образцом, позволяющего использовать образец многократно, размещение контейнера непосредственно в калориметре, а также программная обработка данных, как во время, так и после эксперимента.

Описание установки

В состав установки входят калориметр, измеритель-регулятор ТРМ136 с сетевым интерфейсом RS-485, два регулируемых блока питания для двигателя и съемного нагревателя, терморегулятор, компьютер с операционной системой Windows 7 и выше (*рисунок 1*).

Сосуд калориметра состоит из фольгированного снаружи полипропиленового контейнера, помещенного в сосуд Дьюара. Использование сосуда Дьюара в данном случае оправдано его малым теплообменом с окружающей средой. Сосуд Дьюара помещается в пенополистироловую оболочку, заключенную в металлический корпус. В контейнере, помещенном в сосуд Дьюара, размещены мешалка, термодатчик, датчик температуры терморегулятора, фторопластовая втулка для контейнера с образцом и трубчатого нагревателя (*рисунок 2*).

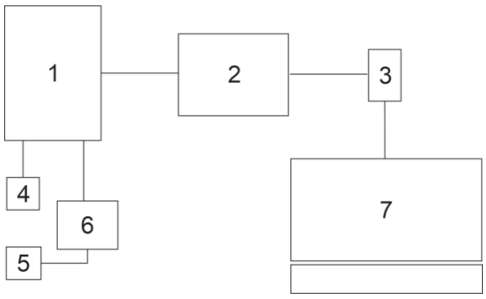


Рис. 1. Функциональная схема установки УТПЛ:
1 – калориметр, 2 - измеритель-регулятор ТРМ136,
3 – сетевой интерфейс RS-485, 4 – блок питания для двигателя мешалки, 5 – блок питания для съемного нагревателя, 6 – терморегулятор, 7 – персональный компьютер

В качестве регистратора получаемых температур, путем опроса последовательно подключенных датчиков, используется измеритель-регулятор ТРМ136. Выбор ТРМ136 обусловлен его хорошими техническими характеристиками, небольшой стоимостью и возможностью снимать показания одновременно с 6 подключенных датчиков. Опрос датчиков осуществляется по замкнутому циклу автоматическим коммутатором управляемым микропроцессором по заданной пользователем программе [6].

Нагрев калориметрической жидкости (дистиллированная вода) осуществляется съемным трубчатым нагревателем, помещаемым через фторопластовую втулку контейнера калориметра. Предельная температура нагрева устанавливается терморегулятором. По достижении выбранной пользователем температуры жидкости калориметра подается звуковой сигнал, и реле терморегулятора отключает питание нагревателя, после чего нагреватель извлекается. Калориметр закрывается крышкой и начинается запись данных начального периода (устанавливается тепловое равновесие). По окончании определенного интервала времени (3-5 минут) в контейнер калориметра через фторопластовую втулку помещается контейнер с образцом.

При помещении контейнера с образцом в калориметре наступает основной период – происходит теплообмен между образцом и жидкостью калориметра, при котором идет интенсивное из-

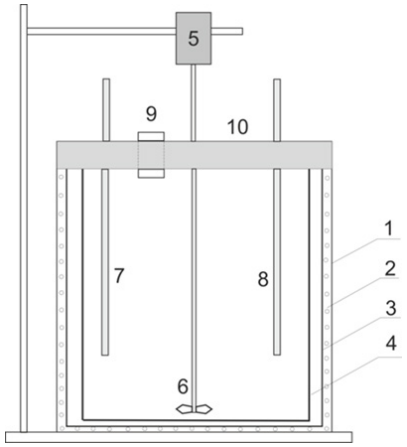


Рис. 2. Схема калориметра: 1 – металлический корпус, 2 – пенополистироловая оболочка, 3 – сосуд Дьюара, 4 – фольгированный полипропиленовый контейнер, 5 – эл. двигатель мешалки, 6 – мешалка, 7 – термодатчик, 8 – датчик температуры терморегулятора, 9 – фторопластовая втулка для контейнера с образцом и трубчатого нагревателя, 10 – крышка.

менение температуры. Заключительным этапом эксперимента является наступление конечного периода – выравнивание температуры внутри калориметра после основного периода (*рисунок 3*).

В основном аккумуляторы холода представляют собой жидкость определенного состава, помещенную в пластиковую оболочку. В нашем случае, для того чтобы приблизить процесс плавления к рабочим условиям в которых находится аккумулятор холода, контейнером для образца была выбрана центрифужная пробирка объемом 15 мл. Образец представляет собой залитый в контейнер водный раствор соли или кислоты известной массы выдержанный в морозильной камере до получения эвтектического твердого раствора.

Описание эксперимента и программного обеспечения

Метод определения удельной теплоты плавления применяемый в эксперименте заключается в сравнении энтальпий плавления исследуемых образцов с эталоном, в качестве которого используется образец со льдом.

Учитывая одинаковый температурный режим (фиксированная конечная температура) и идентичность среды калориметра при исследовании всех образцов нет необходимости дополнительной калибровки калориметра. Таким образом, весь процесс исследования, получения и обработки значений контролируется программным обеспечением («Энплис 1.0»), использующим экстраполяционный метод [7].

Программное обеспечение имеет последовательный интерфейс, т.е. нет нагромождения табов и панелей с меню. Программа с помощью диалоговых окон подсказывает пользователю дельнейшие действия.

Перед началом работы на установке УТПЛ в разработанную программу «Энплис 1.0» заносятся данные (*рисунок 4*) по массе пустых центрифужных пробирок в количестве зависимом от числа исследуемых составов, массе образцов (одинаковая для всех), массе жидкости в калориметре (вода), теплоемкости жидкости калориметра (вода), табличного значения удельной теплоты плавления эталона (лед).

При нажатии кнопки «Ввод» откроется окно запроса с кнопками получения данных с измеритель-регулятора ТРМ136 («Запуск ТРМ136») или перейти к обработке ранее полученных данных («Расчет УТПЛ»). Нажатие кнопки «Запуск ТРМ136» запустит окно с выбором температуры,

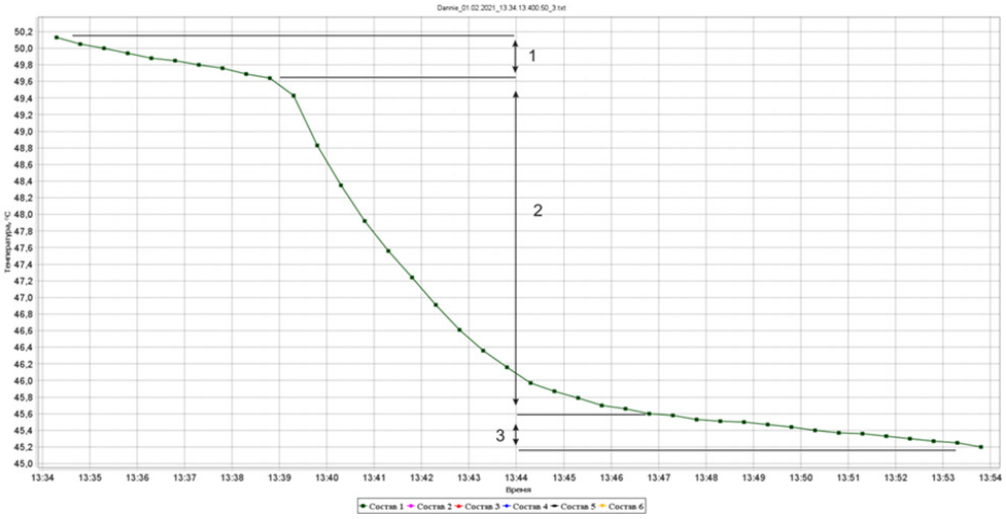


Рис. 3. Три периода изменения температуры: 1 – начальный период, 2 – основной период, 3 – конечный период

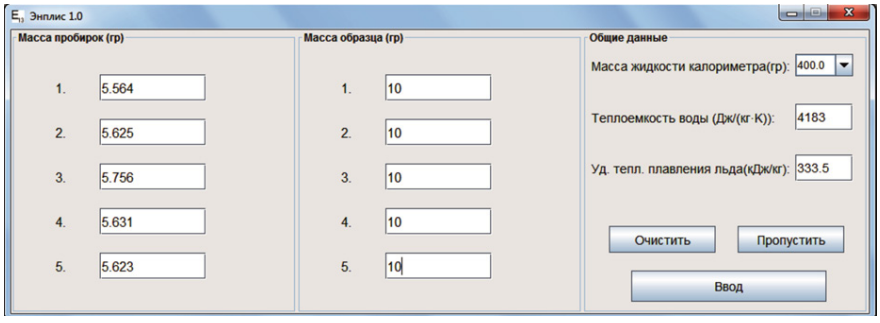


Рис. 4. Начальное окно ввода данных

при которой воспроизведется сигнал.

При нажатии кнопки «Выбрать» начнется процесс получения данных с прибора ТРМ136 в реальном времени, нажатие кнопки «Пропустить» также запустит процесс получения данных, но при достижении выбранной температуры сигнал проигран не будет.

Одновременно на установке включается нагрев калориметрической жидкости (подается напряжение на трубчатый нагреватель) до температуры, выставленной пользователем на терморегуляторе. По достижении намеченной температуры проиграется сигнал, и терморегулятор отключит напряжение на нагревателе. Из калориметра извлекается трубчатый нагреватель и по нажатию кнопки «Расчет УТПЛ» открывается основное окно программы «Энплис 1.0». В окне программы выбирается первый канал и нажимается кнопка «Старт» запускающая режим получения и записи начального периода, продолжающегося примерно 5 минут. После чего в калориметр через фторопластовую втулку вводится контейнер с эталоном (образец со льдом). Начинается регистрация данных основного и конечного периодов. Все данные отображаются графически в окне программы и одновременно записываются в текстовой файл. Нажатие кнопки «Полный график» позволяет в любой момент времени посмотреть весь график целиком, что намного удобнее скроллинга содержимого окна применяемого в других графических программах. Любой фрагмент графика можно масштабировать выделением нужной области мышью или выбором соответствующего пункта в контекстном меню. Также из контекстного меню можно сохранить график в удобном для пользователя графическом формате.

Расчет удельной теплоты плавления эталона (образец со льдом) производится после завершения конечного периода при нажатии кнопки «Расчет УТПЛ» (*рисунок 5*).

Для получения данных по удельной теплоте плавления образцов с исследуемыми составами весь цикл измерений необходимо повторить, заменив образец с эталоном на образец с исследуемым составом.

В качестве первичных преобразователей использовались термопары хромель-алюмель. Точность измерения температуры составляет ±0.5%.

Заключение

Представленная экспериментальная установка УТПЛ позволяет при минимальных затратах получать данные по энтальпиям плавления льдосодержащих смесей. В данной установке образцы размещены в контейнерах, помещаемых при исследованиях в калориметр. Таким образом, можно исследовать каждый образец многократно. Расчет результата измерения выполняется экстраполяционным методом, позволяющим наиболее точно рассчитать изменение температуры Δt, вне зависимости от теплообмена между калориметром и окружающей средой. Общий вид установки УТПЛ представлен на *рисунке 6*.

Для регистрации, обработки, вывода и визуализации данных была разработана программа для компьютера «Энплис 1.0», представляющая собой JavaDesktop-приложение с интуитивно понятным графическим интерфейсом. Реализован экспорт результатов расчета в текстовой и графический файл. Данная программа написана на языке программирования Java в интегрированной среде разработки IntelliJ-Idea CommunityEdition

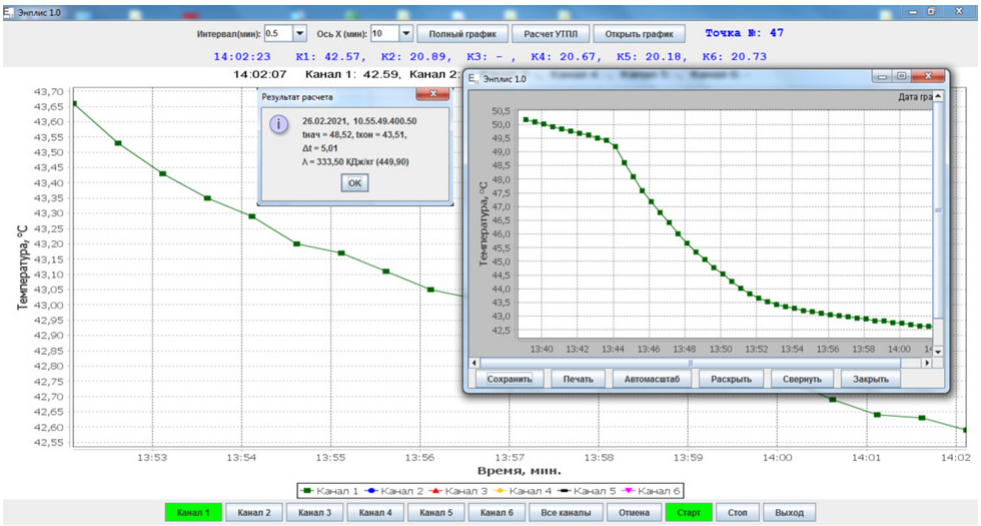


Рис. 5. Окно программы «Энплис 1.0» с отображением текущих данных, окном полного графика и окном расчета удельной теплоты плавления образца со льдом

2020.3.2 с использованием графических библиотек Swing и JFreeChart [8-10].

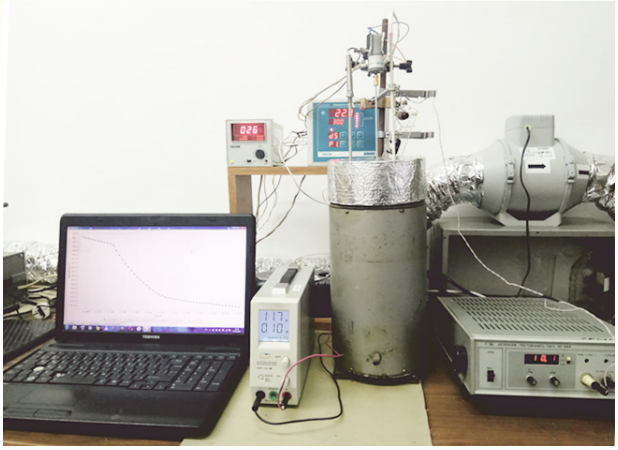


Рис. 6. Общий вид установки УТПЛ

Литература

1. Крайнев А.А., Сериков С.А. Эффективность использования аккумуляторов естественного холода в составе холодильной установки // Науч. журн. НИУ ИТМО; серия «Холодильная техника и кондиционирование», 2012. №2.
2. Iskenderov E.G., Dvoryanchikov V.I. Study of phase transitions in thermal analysis for condensed media using the time interval method // Science education practice. Toronto: Scientific publishing house Infini, 2020. С.115-122.
3. Абдрахманов Р.Ф. Вода – самый сложный природный раствор // Геологический вестник, 2020. №2. С.110-115.
4. Макашев Ю.А., Кириллов В.В. Аномальные свойства воды и возможность их использования для получения энергии // Вестник Международной академии холода, 2013. №2. С.32-34.
5. Алхасов А.Б., Абдуллаев А.А., Рабаданов Г.А. Химический расчет динамики аномалий жидкой воды / Успехи современного естествознания, 2017. №10. С.7-10.
6. Бессекерский В.А., Попов Е.П.. Теория систем автоматического управления. 4-е изд. СПб.: Профессия, 2007. 752 с.
7. Искендеров Э.Г., Дворянчиков В.И., Магомедов М.М.-Ш. Определение удельной теплоты плавления льдосодержащих водных растворов солей и кислот экстраполяционным методом // Известия высших учебных заведений. Северо-кавказский регион, 2020. №3. С.103-108.
8. Java Language. URL: https://www.oracle.com/technetwork/java/index.html (дата обращения: 10.06.2020).
9. Среда разработки InelliJ IDEA. URL: https://www.jetbrains.com/idea/ (дата обращения: 10.02.2021).
10. Графическая библиотека JFreeChart: https://jfree.org/jfreechart/ (дата обращения: 10.02.2021).

УДК 528.5–187.4+528.526.6+528.13+681.7+681.2.089

ОПЫТ СОЗДАНИЯ КОМПЛЕКСА МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СРЕДСТВ ВЫСОКОТОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ АЗИМУТА

EXPERIENCE IN CREATING A COMPLEX OF METROLOGICAL SUPPORT FOR HIGH–PRECISION MEASUREMENTS OF AZIMUTH

Сергей Борисович Беркович
почётный геодезист РФ
доктор технических наук, профессор
начальник управления
навигационно-геодезических систем
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7 (4967) 35-31-93
E-mail: naviserp5@iifmail.ru

Рамиль Равильевич Бикмаев
начальник отдела
управления навигационно-геодезических
систем МОУ «ИИФ»

Николай Иванович Котов
заслуженный работник высшей школы РФ
отличник геодезии и картографии РФ
кандидат технических наук, профессор
заместитель начальника управления
навигационно-геодезических систем МОУ «ИИФ»

Александр Юрьевич Махаев
заслуженный работник геодезии и картографии РФ
почётный геодезист РФ
начальник отдела - заместитель начальника
управления навигационно-геодезических систем
по топогеодезическому и навигационному
обеспечению МОУ «ИИФ»

Алексей Викторович Шолохов
доктор технических наук, профессор
ведущий научный сотрудник
управления навигационно-геодезических систем
МОУ «ИИФ»

Аннотация

Рассмотрена задача создания опорных направлений, обеспечивающих выполнение метрологических требований поверки высокоточных средств измерений азимута. Обоснован приборный состав комплекса средств обеспечения азимутальных измерений и алгоритмы передачи направлений на коротких линейных базисах, характеризующиеся минимальными потерями в точности при выполнении операций. Проведен анализ составляющих погрешностей определения азимута опорного направления, на основе которого обоснованы метрологические требования к составляющим погрешностей. Предложены рекомендации по повышению точности геодезического способа измерений азимутов линейных базисов.

Ключевые слова: средства измерений азимута; метрологическое обеспечение; геодезический метод определения азимута; короткий линейный базис; оптимальная обработка избыточных измерений.

Summary

The problem of creating reference directions that ensure the fulfillment of metrological requirements for the verification of high-precision azimuth measuring instruments is considered. The composition of the instruments of the set of means for providing azimuthal measurements is justified. Algorithms for determining directions on short linear bases, characterized by minimal losses in accuracy when performing operations, are presented. The analysis of the components of the measurement errors of the azimuth of the reference direction is carried out, on the basis of which the metrological requirements for the components of the errors are justified. Recommendations for improving the accuracy of the geodetic method of measuring the azimuths of linear bases are proposed.

Keywords: azimuth measuring instruments; metrological support; geodetic method for determining the azimuth; short linear basis; optimal handling of redundant measurements.

Введение

Комплекс средств метрологического обеспечения средств измерений азимута (КСМО СИА) [1] должен обеспечить поверки астрономических, гироскопических и геодезических средств азимутального ориентирования, погрешности которых в настоящее время не превышают единиц угловых секунд [2-6]. Основными метрологическими требованиями, предъявляемыми к такому комплексу, являются надежность и прецизионная точность задания и хранения опорных азимутальных направлений. При этом, исходя из нормативных требований метрологического обеспечения [7-9], погрешности опре-

деления астрономических азимутов опорных направлений не должны превышать третьей части погрешностей поверяемых приборов. Данные требования обеспечиваются комплексным (многоальтернативным) подходом к способам определения азимутов, включая оптимальную обработку избыточных измерений.

Схема расположения элементов КСМО СИА приведена на *рисунке 1*. Опорными направлениями являются нормали к четырем зеркальным граням оптического хранителя опорных направлений (ОХАН) и два направления линейных базисов между геодезическими пунктами: ГП 1-ГП 2 и ГП 1-ГП 3.

На *рисунке 1* для простоты и наглядности приведены только два угла, определяющие азимуты соответствующих направлений:

- A_{x4} – астрономический азимут входящей нормали к четвертой грани оптической призмы (здесь и далее принята нумерация граней по часовой стрелке, начиная от внутренней, со стороны астровизира);
- A_{12} – астрономический азимут линейного базиса ГП 1-ГП 2.

Оптический хранитель азимутальных направлений расположен в помещении астропавильона (АП). На специальном фундаменте Ф 1 размещен астровизир автоматической системы определения астрономического азимута (АСОАА), который по результатам наблюдения небесных светил определяет астрономический азимут A_1 выходящей нормали первой грани призмы. На пилонах Пл 1 и Пл 2 устанавливаются гироскопические средства измерений азимута при их поверке с использованием опорных направлений $A_{хн\,2}$ и $A_{хн\,4}$.

Опорные направления линейных базисов используются при поверках астрономических теодолитов (устанавливаются на фундаменте Ф 3) и приемников спутниковых навигационных систем геодезического класса (устанавливаются на фундаментах Ф3, Ф4 и Ф5).

Целью настоящей статьи является обоснование метрологических требований к элементам КСМО и алгоритмов обработки измерительной информации, обеспечивающих заданное значение среднеквадратической погрешности определения астрономического азимута опорного направления.

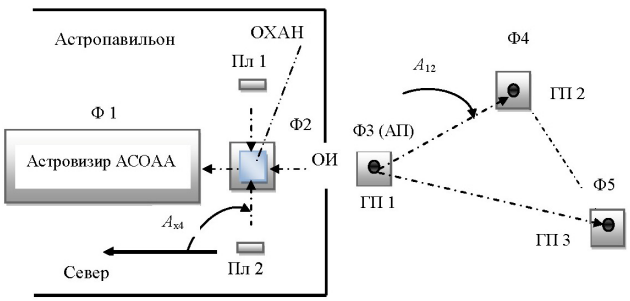


Рис. 1. Схема расположения элементов КСМО СИА

Постановка задачи

Исходные данные. При определении астрономических азимутов опорных направлений используются три средства измерений:

- астровизир АСОАА, определяющий в автоматическом режиме по видимой кульминации небесных светил азимут первой грани оптической призмы $A_{1АВ}$;
- астрономический теодолит, используя который оператор определяет по результатам наблюдений Полярной звезды азимут третьей грани оптической призмы $A_{3АТ}$;
- комплект приемников геодезической спутниковой аппаратуры, устанавливаемых на геодезических пунктах для определения азимутов линейных базисов A_{12}, A_{13}.

Составляющие погрешности определения азимута опорного направления принимаются случайными взаимно независимыми величинами, распределенными по нормальному закону.

Для конкретизации решаемой задачи условимся считать за опорное направление входящую нормаль ко второй грани оптической призмы, астрономический азимут которой A_2 необходимо определить с заданнымзначением среднеквадратической погрешности σ_{A2}.

Задача носит комплексный характер и состоит в следующем:

- сформировать алгоритмы передачи направлений на вторую грань призмы по результатам измерений средствами комплекса;
- провести анализ составляющих погрешностей определения азимута опорного направленияс учетом условий передачи и используемых алгоритмов оптимального осреднения избыточной информации σ_i;
- обосновать метрологические требования к составляющим погрешностей определения азимута опорного направления, обеспечивающим заданное значение итоговой среднеквадратической погрешности:

$$\sigma_{A2} = \sqrt{\sigma_i^2} \le \sigma_{зад}; \qquad (1)$$

- разработать способы повышения точности отдельных измерений, обеспечивающие обоснованные метрологические требования:

$$A_i = F_i(p_k); \rightarrow \sigma_{Ai} \le \sigma_{Ai\,зад}. \qquad (2)$$

Формирование алгоритмов передачи направлений

Значение астрономического азимута опорного направления A_2 определяется оптимальным

осреднением результатов передачи направлений на грань 2 с граней 1 и 3 оптической призмы:

$$A_2 = K_2 A_{AB\,12} + (1-K_2)A_{32}; \quad K_2 = \frac{\sigma_{32}^2}{\sigma_{AB12}^2 + \sigma_{32}^2}, \quad (3)$$

где K_2 – коэффициент оптимального осреднения результатов передачи азимутов с первой и третьей граней призмы на вторую грань, зависящий от соотношения величин погрешностей указанных результатов $\sigma_{AB\,12}$ и σ_{32};

$A_{AB\,12}$ – значение азимута входящей нормали второй грани, вычисленное по результатам передачи направления от значения азимута A_{1AB} выходящей нормали первой грани в соответствии с выражением:

$$A_{AB12}=A_{1AB}+\delta_{12}+180; \quad (4)$$

d_{12} – значение угла между первой и второй гранями призмы, паспортизованное с погрешностью σ_d;

A_{32} – значение азимута входящей нормали второй грани, вычисленное по результатам передачи направления от значения азимута A_3 входной нормали третьей грани в соответствии с выражением:

$$A_{32}=A_3+\delta_{23}. \quad (5)$$

В свою очередь значения астрономических азимутов $A_{1\,AB}$ и A_3 определяются согласно выражениям:

$$A_{1\,AB}=A_{AB}+\alpha_{КЭ}, \quad (6)$$

где A_{AB} – значение азимута визирной оси астровизира, измеренного АСОАА с погрешностью σ_{AB};

$\alpha_{КЭ}$ – значение угла между визирной осью и нормалью к первой грани призмы, измеренного АСОАА с погрешностью $\sigma_{КЭ}$,

$$A_3 = K_3 A_{3\,AT} + (1-K_3)A_{3\,AГ}, \quad (7)$$

где A_{3AT} – значение азимута входящей нормали к третьей грани призмы, измеренного астрономическим теодолитом с погрешностью σ_{3AT};

$A_{3AГ}$ – значение астрономического азимута нормали к третьей грани призмы, полученноепутем передачи направлений от линейных базисов ГП 1-ГП 2 и ГП 1-ГП 3с погрешностью $\sigma_{3Г}$;

$$A_{3Г} = 0{,}5(A3_{Г12} + A3_{Г13}); \; A_{Г12} = A^a_{Г12} + \alpha_{12-x}; \; A_{Г13} = A^a_{Г13} + \alpha_{13-x}; \; A^a_{Г12} = A_{12} + \Delta_{л\,12}; \; A^a_{Г13} = A_{13} + \Delta_{л\,13} \quad (8)$$

где $A^a_{Г12}$, $A^a_{Г13}$ – значения астрономических азимутов линейных базисов, вычисленные с погрешностями σ_{a12} и σ_{a13}, соответственно;

A_{12}, A_{13} – значения геодезических азимутов линейных базисов, определенных с использованием приемников спутниковой геодезической аппаратуры с погрешностями σ_{12} и σ_{13};

$\Delta_{л\,12}$ и $\Delta_{л\,13}$ – поправки Лапласа для перехода от геодезического азимута к астрономическому, определенные с использованием измеренных значений составляющих уклонений отвесной линии с погрешностью $\sigma_л$.

Анализ составляющих погрешностей определения азимута опорного направления

Анализ составляющих погрешностей определения азимута опорного направления проводится поэтапно на основании приведенных вышевыражений определения азимутов отдельных элементов КСМО и опорного направления в целом (3)-(8).

1. Оценка погрешности значения азимута входящей нормали второй грани, вычисленного по результатам передачи направления от значения азимута A_{1AB} выходящей нормали первой грани в соответствии с выражениями (4), (6) определяется следующим выражением:

$$\sigma_{AB\,12} = \sqrt{\sigma_{AB}^2 + \sigma_{КЭ}^2 + \sigma_\delta^2}. \quad (9)$$

2. Оценка погрешности измерения астрономическим теодолитом азимута входящей нормали к третьей грани призмы определяется погрешностью σ_{AT} определения азимута заданного направления собственно теодолитом и погрешностью $\sigma_{ОИ}$ оптического иллюминатора, через который проводится привязка теодолита к грани оптической призмы в соответствии со следующим выражением:

$$\sigma_{3AT} = \sqrt{\sigma_{AT}^2 + \sigma_{ОИ}^2}. \quad (10)$$

3. Оценка погрешности определения астрономического азимута нормали к третьей грани призмы, полученного путем передачи направлений от линейных базисов ГП 1-ГП 2 и ГП 1-ГП 3 с учетом обеспечения привязки теодолита к призме через оптический иллюминатор в соответствии с выражениями (8):

$$\sigma_{3AГ} = \sqrt{\frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{\Delta л12}^2 + \sigma_{\alpha 12}^2 + \sigma_{ил}^2}{2}}. \quad (11)$$

4. Оценка погрешности уравнивания значения астрономического азимута нормали к третьей грани призмы по результатам использования астрономического и геодезического методов в соответствии с формулой (7):

$$\sigma_{A3} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{3AГ}^2}{\sigma_{3AГ}^2 + \sigma_{3AT}^2}\right)^2 \sigma_{3AT}^2 + \left(1 - \frac{\sigma_{3AГ}^2}{\sigma_{3AГ}^2 + \sigma_{3AT}^2}\right)^2 \sigma_{3AГ}^2}. \quad (12)$$

5. Оценка погрешности значения астрономического азимута нормали ко второй грани призмы, переданного от третьей грани в соответствии с выражением (5):

$$\sigma_{A32} = \sqrt{\sigma_{A3}^2 + \sigma_\delta^2}. \quad (13)$$

6. Оценка погрешности окончательного значения астрономического азимута нормали ко второй грани призмы (опорного направления) в соответствии с выражением (3):

$$\sigma_{A2} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{32}^2}{\sigma_{32}^2 + \sigma_{AB12}^2}\right)^2 \sigma_{AB12}^2 + \left(1 - \frac{\sigma_{32}^2}{\sigma_{32}^2 + \sigma_{AB12}^2}\right)^2 \sigma_{32}^2}. \quad (14)$$

Обоснование метрологических требований к составляющим погрешностей определения азимута опорного направления

С целью обоснования требований к погрешностям составных частей КСМО, обеспечивающим метрологические требования к заданию опорного направления (1), было проведено математическое моделирование погрешностей (оценка среднеквадратичной ошибки – СКО) астрономического азимута к нормали второй грани призмы ОХАН в соответствии с выражениями (9)-(14). Результаты вычислений для различных значений СКО составляющих погрешностей приведены в *таблице 1*.

Выводы по результатам анализа составляющих погрешностей определения азимута опорного направления, приведенным в *таблице 1*.

1. Комплексирование измерительной информации от трех независимых систем и приборов принципиально обеспечивает СКП определения астрономического азимута опорного направления 1" и менее.

2. СКП 0,7" и менее обеспечивается при определении азимута линейных базисов геодезическим способом с погрешностями до 2,0", погрешностью измерения азимута астрономическим теодолитом до 1,3" и погрешностью АСО-АА 0,7" и менее.

3. Приведенные в п.2 метрологические характеристики соответствующих измерений в настоящее время достижимы без применения дополнительных способов обработки первичных измерений [9-12].

4. Требуемое значение погрешности определения астрономического азимута 0,5" можно обеспечить при достижении погрешности определения азимута линейных базисов 1,0" и менее. Данное ограничение требует дополнительного рассмотрения.

Предложения по повышению точности геодезического способа измерений азимутов линейных базисов

Геодезический способ азимутального ориентирования при использовании геодезической спутниковой аппаратуры с погрешностью определения приращений координат 5 мм на линейных базисах длиной 2000 м обеспечивает погрешности определения азимута 0,5" [9]. На базисах с ограниченными по расстоянию сторо-

Таблица 1

Сводные результаты влияний погрешностей составных частей на общую погрешность определения азимута опорного направления

Параметры	Значения параметров, угл.с.										
$\sigma_{АВ}$	1,5	1,0	0,7	0,7	0,7	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
$\sigma_{КЭ}$	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4
σ_{d}	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
$\sigma_{АВ\,12}$	1,59	1,14	0,88	0,88	0,88	0,81	0,74	0,74	0,74	0,67	0,67
$\sigma_{АТ}$	2,0	1,5	1,3	1,2	1,0	0,8	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
$\sigma_{ОИ}$	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,3
$\sigma_{ЗАТ}$	2,01	1,51	1,32	1,22	1,02	0,82	1,12	1,12	1,12	1,10	1,14
σ_{12}	3,0	2,5	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,2	1,2	1,1	1,0
$\sigma_{Дл}$	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3
$\sigma_{а}$	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
$\sigma_{ЗАГ}$	2.17	1,83	1,48	1,48	1,15	1,15	1,14	0,95	0,95	0,88	0,85
$K_{ЗАГ}$	0,46	0,41	0,44	0,4	0,44	0,34	0,49	0,58	0,58	0,61	0,64
$K_{ЗАТ}$	0,54	0,59	0,56	0,6	0,56	0,66	0,51	0,42	0,42	0,39	0,36
$\sigma_{А3}$	1,48	1,17	0,98	0,94	0,76	0,67	0,80	0,73	0,73	0,69	0,68
$\boldsymbol{\sigma_{А32}}$	1,53	1,23	1,03	0,97	0,82	0,73	0,82	0,79	0,78	0,75	0,74
$K_{АВ2}$	0,48	0,54	0,58	0,56	0,46	0,45	0,56	0,53	0,53	0,56	0,55
$K_{А32}$	0.52	0,46	0,42	0,44	0,54	0,55	0,44	0,47	0,47	0,44	0,45
$\sigma_{вн}$	1,10	0,84	0,67	0,66	0,60	0,54	0,55	0,54	0,54	0,50	0,50

нами, например, из-за ограничений в вопросах землепользования, погрешности значительно увеличиваются. На длине базиса 500 м при погрешности геодезической аппаратуры 5 мм погрешность определения азимута составит более 2,5", что не обеспечит достижение общей погрешности определения азимута опорного направления 0,5".

Для обеспечения требуемого значения погрешности определения азимута базовых линий (σ_{A12}<1,0", σ_{A13}<1,0") предлагается способ повышения исходной точности с использованием комплексной обработки избыточной измерительной информации [13]. В качестве такой информации можно использовать дополнительные по отношению к измеренным приращениям координат измерения длин линейных базисов d_{12}, d_{13}, d_{23} и углов между ними f_1, f_2, и f_3. Схема азимутального миниполигона, образованного тремя геодезическими пунктами (линейными базисами), представлена на *рисунке 2*.

К измеряемым относятся следующие основные параметры:

- приращения прямоугольных геоцентрических координат между пунктами миниполигона ΔX_{12}, ΔY_{12}, ΔZ_{12}, ΔX_{13}, ΔY_{13}, ΔZ_{13}, ΔX_{23}, ΔY_{23}, ΔZ_{23}, измеренные спутниковой геодезической аппаратурой космических навигационных систем;
- геодезические координаты пунктов B_1, L_1, B_2, L_2, B_3, L_3, измеренные спутниковой геодезической аппаратурой космических навигационных систем.

Дополнительно измеренные параметры:

- длины линейных базисов Id_{12}, Id_{13}, Id_{23}, измеренные дальномером;
- углы между направлениями линейных базисов $I_{\varphi 1}$, $I_{\varphi 2}$, $I_{\varphi 3}$, измеренные электронным тахеометром.

Обработка избыточной измерительной информации включает следующие этапы.

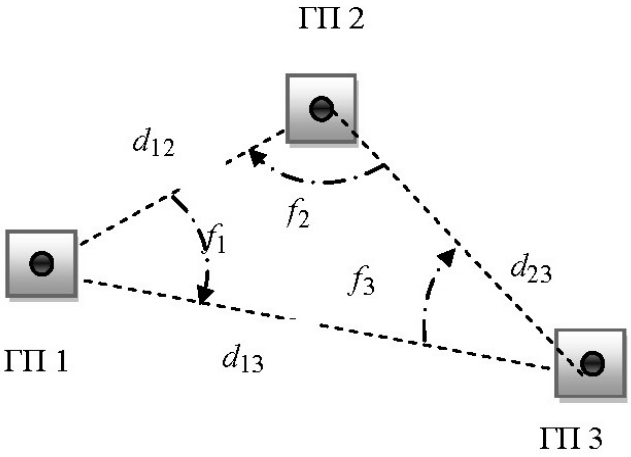


Рис. 2. Схема азимутального миниполигона

1. Вычисление, по измеренным приращениям координат, геодезических азимутов линейных базисов по следующим алгоритмам [9]:

$$VA_{ij} = arctg \frac{\Delta Y_{ij}\cos L_i - \Delta X_{ij}\sin L_i}{\Delta Z_{ij}\cos B_i - (\Delta X_{ij}\cos L_i + \Delta Y_{ij}\sin L_{ij})\sin B_j}. \quad (15)$$

2. Вычисление, по измеренным приращениям координат, длин линейных базисов и углов между ними:

$$Vd_{12} = \sqrt{\Delta X_{12}^2 + \Delta Y_{12}^2 + \Delta Z_{12}^2};\ Vd_{13} = \sqrt{\Delta X_{13}^2 + \Delta Y_{13}^2 + \Delta Z_{13}^2}$$
$$Vd_{213} = \sqrt{\Delta X_{23}^2 + \Delta Y_{23}^2 + \Delta Z_{23}^2};\ V\varphi_1 = VA_{13} - VA_{12};$$
$$V\varphi_2 = VA_{23} - VA_{12} + 180;\ V\varphi_3 = VA_{23} - VA_{13}. \quad (16)$$

3. Формирование минимизируемых функционалов невязок длин и углов:

$$F_d = (Id_{12} - Vd_{12})^2 + (Id_{13} - Vd_{13})^2 + (Id_{23} - Vd_{23})^2 \xrightarrow[VX_{ij}, VY_{ij}, VZ_{ij} \quad (i,=1,2,3,\ j=1,2,3)]{} \min;$$
$$F_\varphi = (I\varphi_1 - V\varphi_1)^2 + (I\varphi_2 - V\varphi_2)^2 + (I\varphi_3 - V\varphi_3)^2 \xrightarrow[VX_{ij}, VY_{ij}, VZ_{ij} \quad (i,=1,2,3,\ j=1,2,3)]{} \min \quad (17)$$

4. Циклические вычисления параметров выражений (17) при изменениях приращений координат путем последовательного перебора или

а)

б)

Рис. 3. Общий вид сооружений КСМО СИА: а) здание АП с отдельными геодезическими пунктами; б) размещение метрологического оборудования внутри АП

методом Ньютона-Гаусса:

$$VX_{i+1,j+1}(VY_{i+1,j+1}, VZ_{i+1,j+1}) = VX_{i,j}(VY_{i,j}, VZ_{i,j}) + K\Delta_{ш}, \quad (18)$$

где $\Delta_{ш}$ – величина шага изменений приращений координат;

K – номер цикла (K=1,2,3,…,N). На каждом шаге вычисляются значения азимутов (15), длин линейных базисов и углов меду ними (16).

5. Отыскание минимального значения функционалов (17) и соответствующих ему оптимальных значений азимутов $VA_{ij}^{опт}$.

На основании алгоритма, представленного этапами 1-5, разработано специальное программное обеспечение, реализованное в автоматизированном рабочем месте обработки измерительной информации КСМО. С учетом специальных методических приемов, сущность которых остается за рамками настоящей статьи, время на полный перебор возможных значений координат трех точек в диапазоне ±10 мм от измеренных значений с шагом 0,1 мм составляет менее 0,1 часа.

Заключение

По исходным данным, разработанным в МОУ «ИИФ» [14], на территории ФГУП «ВНИИФТРИ» [15] построен АП и сооружения азимутального миниполигона. Внутри АП проведен монтаж разработанного и изготовленного оборудования комплекса средств метрологического обеспечения средств измерений азимута (*рисунок 3*).

При проведении приемосдаточных испытаний получены следующие реализации проведенных измерений в соответствии с обозначениями выражений (4)-(8) и *таблицей 1*:

$A_{AB\,12}$=269° 40'18,42"; A_{32}=269°40'18,85";

A_2=269°40'17,74".

Результат контрольного измерения азимута второй грани гироскопическим прибором автономного азимутального ориентирования, который был предварительно эталонирован на опорном направлении во внешней организации, $A_{2ГК}$=269°40'18,42". С учетом приписанного гирокомпасу значения СКП $\sigma_{ГК}$=2,6" данный результат подтверждает возможность проведения специальных исследований по формированию специального эталона обеспечения средств измерений азимута.

Литература

1. Котов Н.И. Метрологическое обеспечение средств измерений азимута / Н.И. Котов, А.В. Костюков, А.Н. Фельдшеров, С.Е. Чернышев, А.В. Яшин// Известия Института инженерной физики, 2019. №2(56). С.16-19.
2. Руководящий технический материал РТМ 68-8.20-93. Полигоны геодезические Общие технические требования. Введен 1.09.94. М.: ЦНИИГАиК, 1994. 9 с.
3. Руководство пользователя GYROMAT 5000. DMT, 2015. 100 с.
4. Описание типа средств измерений «Гироплатформы геодезические GYROMAT 3000». Приложение к свидетельству №56272 об утверждении типа средств измерений.
5. Описание типа средств измерений «Аппаратура геодезическая спутниковая LeicaGS14». Приложение к свидетельству №51997 об утверждении типа средств измерений.
6. МИ БГЕИ 12-91. Определение азимута длиннобазных образцовых направлений. Методика института. М.: ФГУП «ЦНИИГАиК», 1991.
7. Беркович С.Б. Метрологическое обеспечение геодезических средств общего назначения в войсковых условиях / С.Б. Беркович, А.Ю. Махаев, Н.И. Котов, Б.И. Минеев, А.Н. Фельдшеров, С.Е. Чернышев // Материалы X Всероссийской научно-технической конференции «Метрологическое обеспечение обороны и безопасности в Российской Федерации». Пос. Поведники Московской обл., 2014. С.131-135.
8. ГОСТ Р 8.596-2002 ГСИ. Метрологическое обеспечение измерительных систем. Основные положения. М.: Госстандарт. 2012.
9. Котов Н.И. Контроль характеристик точности автоматической системы определения астрономического азимута / С.Б. Беркович, Н.И. Котов, А.Ю. Махаев, С.Е. Чернышев, А.В. Шолохов, Н.В. Кузьмина, С.В. Гайворонский // Измерительная техника, 2019. №7. С.23-28.
10. Махаев А.Ю. Анализ условий высокоточного азимутального ориентирования спутниковой геодезической аппаратурой /А.Ю. Махаев, А.С. Бамбиза //Известия Института инженерной физики, 2017. №1. С.15-19.
11. Чернов И.В. Исследование возможности определения азимута с использованием аппаратуры потребителя космических навигационных систем // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли, 2016. Т.VIII. №3. С.14-20.
12. Беркович С.Б. Применение метода относительных измерений для контроля точностных характеристик автоматической системы определения астрономического азимута / С.Б. Беркович, Н.И. Котов, А.Ю. Махаев, А.В. Шолохов, С.Е. Чернышев, Н.В. Кузьмина, С.М. Тарасов //Сборник материалов XXVI Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам 27-29 мая 2019. С.131-133.
13. Шолохов А.В. Оценка достижимой точности определения азимута на коротком базисе с использованием спутниковых и геодезических средств / С.Б. Беркович, А.Ю. Махаев Н.И., Котов, А.В. Шолохов // Геодезия и картография, 2018. Т.79. №6. С.2-8.
14. Официальный сайт МОУ «Институт инженерной физики»: [сайт]. URL: https://iifrf.ru/
15. Официальный сайт ФГУП «ВНИИФТРИ»: [сайт]. URL:http://www.vniiftri.ru/

УДК 621.592+661.91-404

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОХЛАЖДЕНИЯ СЖИЖЕННОГО МЕТАНА В ТЕПЛООБМЕННОМ АППАРАТЕ, ПРЕДНАЗНАЧЕННОМ ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ КРИОГЕННЫХ ПРОДУКТОВ ПЕРЕД ЗАПРАВКОЙ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ

MATHEMATICAL MODELING OF THE COOLING PROCESS OF LIQUEFIED METHANE IN A HEAT EXCHANGER DESIGNED TO COOL CRYOGENIC PRODUCTS BEFORE REFUELING THE LAUNCH VEHICLE

Алексей Александрович Коробков
кандидат технических наук, доцент
начальник научно-методического управления
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов,
Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7 (496) 735-31-93
E-mail: korobkow@iifmail.ru

Максим Васильевич Кулик
начальник отдела организации научной работы и подготовки научно-педагогических кадров
филиал ВА РВСН имени Петра Великого (г. Серпухов)
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов,
ул. Бригадная, д. 17
Тел.: +7 (903)797-36-67
E-mail: mklik@mail.ru

Альфия Абдрякибовна Садекова
младший научный сотрудник НИО-1
ФГАУ «Военный инновационный технополис «ЭРА»
Адрес: 353456, Краснодарский край, г. Анапа,
Пионерский пр., д. 41
Тел.: +7 (916) 644-72-38
E-mail: tienkiss83@mail.ru

Степан Сергеевич Сергеев
руководитель расчетной группы
ПАО «Криогенмаш»
Адрес: 143907, Московская обл., г. Балашиха,
пр. Ленина, д. 67
Тел.: +7 (495) 505-93-33
E-mail: stepan.sergeev@omzglobal.com

Анатолий Иванович Смородин
почетный работник науки и техники РФ
доктор технических наук, профессор
профессор кафедры Э-4
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана (НИУ)»
Адрес: 107005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5
Тел.: +7 (499) 263-61-27
E-mail: smorodin38@rambler.ru

Аннотация

Представлены результаты математического моделирования охлаждения сжиженного природного газа (метана) в прямоточном теплообменном аппарате (ТОА). Получены результаты параметров ТОА, способного эффективно и надежно переохлаждать сжиженный метан для последующего хранения и заправки ракеты-носителя. Рассмотренная прямоточная схема построения ТОА позволяет сохранить значительную величину температурного напора и обеспечить режим работы без опасности образования твердой фазы на внешней поверхности разделительной стенки, контактирующей с охлаждающей средой, имеющей температуру ниже температуры тройной точки охлаждаемого метана.

Ключевые слова: гидростатическое сопротивление, коэффициент теплоотдачи, математическое моделирование, метан, ракета-носитель, теплообменный аппарат.

Summary

The results of mathematical modeling of cooling of liquefied natural gas (methane) in a direct-flow heat exchanger are presented. The results of the parameters of a heat exchanger capable of efficiently and reliably supercooling liquefied methane for subsequent storage and refueling of the launch vehicle are obtained. The considered direct-flow design of the heat exchanger allows you to maintain a significant value of the temperature head and ensure operation without the risk of solid phase formation on the outer surface of the separation wall in contact with the cooling medium having a temperature below the temperature of the triple point of the cooled methane.

Keywords: hydrostatic resistance, heat transfer coefficient, mathematical modeling, methane, booster, heat exchanger.

Введение

Применение криогенных компонентов ракетного топлива (КРТ) позволяет получить более высокий удельный импульс, чем при использовании только высококипящих КРТ [1]. Кроме того, в отличие от высококипящих КРТ, криогенные компоненты безопаснее с точки зрения отрицательного воздействия на окружающую среду.

Существуют различные способы охлаждения криогенных топлив [2]. Для ракетно-космических систем наибольшее практическое применение нашли теплообменные аппараты (ТОА) из гладких или оребренных труб [3]. Оперируя соотношением расходов прямого и обратного потока и организацией движения потоков («прямоток» или «противоток») [4,5] можно достичь желаемого результата по эффективному охлаждению (переохлаждению) КРТ. Особенно это касается, например, таких компонентов как жидкий азот и жидкий (сжиженный) природный газ (метан). Так температура кристаллизации метана (при нормальном атмосферном давлении)

Таблица 1

Основные исходные параметры для моделирования процесса охлаждения СМ

Параметр	Значение
Основные конструктивные и технологические параметры ТОА	
Тип аппарата	прямоточный
Число потоков	2
Число труб	500
Поток в межтрубном пространстве	«теплый»
Труба	гладкая
Материал труб	нерж. ст. 12Х18Н10Т
Наружный диаметр труб, мм	10
Внутренний диаметр труб, мм	8
Поперечный шаг намотки, мм	11,5
Продольный шаг намотки, мм	12
Число слоев	20
Диаметр сердечника, мм	273
Высота намотки, м	2,5
Основные параметры математической модели для расчета теплообмена и гидравлики	
Теплоотдача при конвекции в трубах	гладкая - 1
Теплоотдача при конвекции в межтрубном пространстве	гладкая - 1
Теплоотдача при кипении в межтрубном пространстве	объем - 1
Гидравлика однофазных потоков в трубах	труба - 1
Теплоотдача однофазных потоков в межтрубном пространстве	гладкая
Гидравлика двухфазных потоков в трубах	Локкарт-Мартинелли
Теплоотдача двухфазных потоков в межтрубном пространстве	Гладкая
Минимальное массовое паросодержание при конденсации	$1 \cdot 10^{-6}$
Максимальное массовое паросодержание при конденсации	0,7
Минимальный температурный напор, необходимый для конденсации	1
Максимальный коэффициент теплоотдачи при конденсации, Вт/м^2/К	$1 \cdot 10^{3}$
Минимальное массовое паросодержание при кипении	$1 \cdot 10^{-6}$
Максимальное массовое паросодержание при кипении	0,6
Минимальный температурный напор, необходимый для кипения	0,1
Максимальный коэффициент теплоотдачи при кипении, Вт/м^2/К	$1 \cdot 10^{3}$
Минимальное паросодержание в трубах (гидравлика)	$1 \cdot 10^{-6}$
Максимальное паросодержание в трубах (гидравлика)	0,6
Минимальное паросодержание в межтрубном пространстве (гидравлика)	$1 \cdot 10^{-6}$
Максимальное паросодержание в межтрубном пространстве (гидравлика)	0,6
Параметры, управляющие процессом моделирования	
Относительный теплоприток, %	0
Коэффициент запаса, %	15
Шаг выдачи результатов расчета (координата по высоте намотки от входа трубных потоков), м	0,2
Шаг интегрирования, м	0,01
Максимальное число итераций при расчете теплообмена при кипении и конденсации	30

Таблица 2

Основные параметры потоков

№	Вещество	Располо-жение потока	Тип потока	Температура потока, К		Давление, МПа		Число труб	Расход, кг/с
				вх.	вых.	вх.	вых.		
1	Метан (CH_4)	межтрубное	«теплый»	112	98	0,3	0,3	0	22
2	Азот (N_2)	трубное	«холодный»	78	80	0,2	0,2	500	6,3

равна 90,66 К, а аналогичная температура кристаллизации азота составляет 78,0 К.

Для обеспечения температуры жидкого метана равной 94,0 К более всего подходит прямоточная схема движения потоков [5].

Для решения задачи эффективного и надежного переохлаждения сжиженного метана (СМ) для хранения и заправки ракеты-носителя (РН) [5-8] необходимо рассмотреть важный, с точки зрения практического применения, случай переохлаждения топлива, имеющего температуру тройной точки значительно выше температуры насыщения охлаждающей среды – охлаждения СМ кипящим азотом. Такой процесс наиболее эффективно реализуется в ТОА витого типа [5], позволяющим в широком диапазоне конфигурировать геометрию теплообменной поверхности, и тем самым влиять на величину и соотношение процессов теплообмена в трубном и межтрубном пространстве.

В рассматриваемом случае принята следующая схема расположения потоков [5]:

- поток охлаждающего азота направляется в трубное пространство, что позволяет поддерживать в ТОА небольшой запас холода, и снижает таким образом опасность образования твердой фазы метана в случае колебания соотношения потоков;
- движение кипящего азота в трубном пространстве позволяет путем соответствующего подбора количества труб обеспечить относительно невысокие коэффициенты теплоотдачи, как в двухфазной области, так и в области конвективного теплообмена, что способствует смещению температуры стенки трубы в сторону охлаждаемого метана;
- движение охлаждаемого метана происходит в межтрубном пространстве, представляющим собой систему поперечно-обтекаемых цилиндрических труб, что обеспечивает гидродинамическую обстановку, благоприятствующую интенсификации теплообмена, что в сочетании с высокими теплофизическими свойствами жидкого и газообразного метана позволяет организовать процесс с высокой интенсивностью теплоотдачи, и в свою очередь приблизить температуру стенки трубы к температуре метана.

1. Моделирование процесса охлаждения СМ в ТОА

Основные исходные данные представлены в *таблицах 1, 2*.

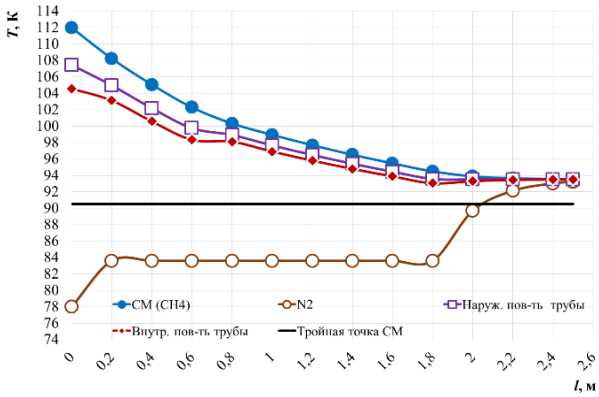


Рис. 1. Изменение температуры потоков (*T*) по высоте намотки (*l*) прямоточного трубчатовитого ТОА

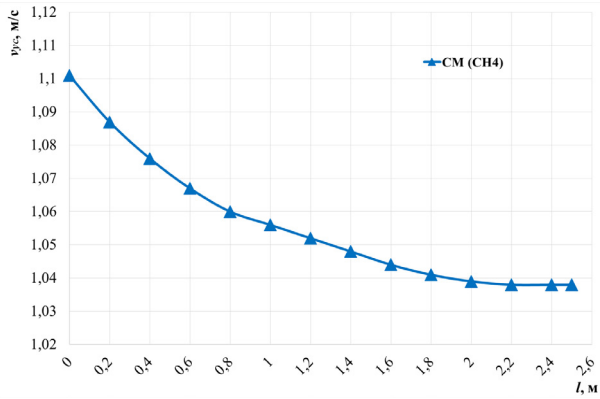


Рис. 2. Зависимость скорости трубного потока СМ в узком сечении (v_{yc}) от координаты по высоте намотки ((*l*) от входа в ТОА)

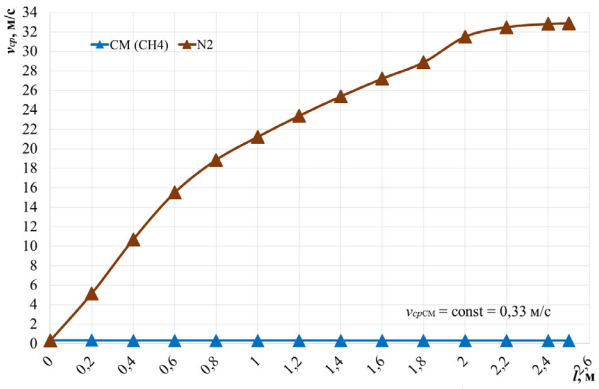
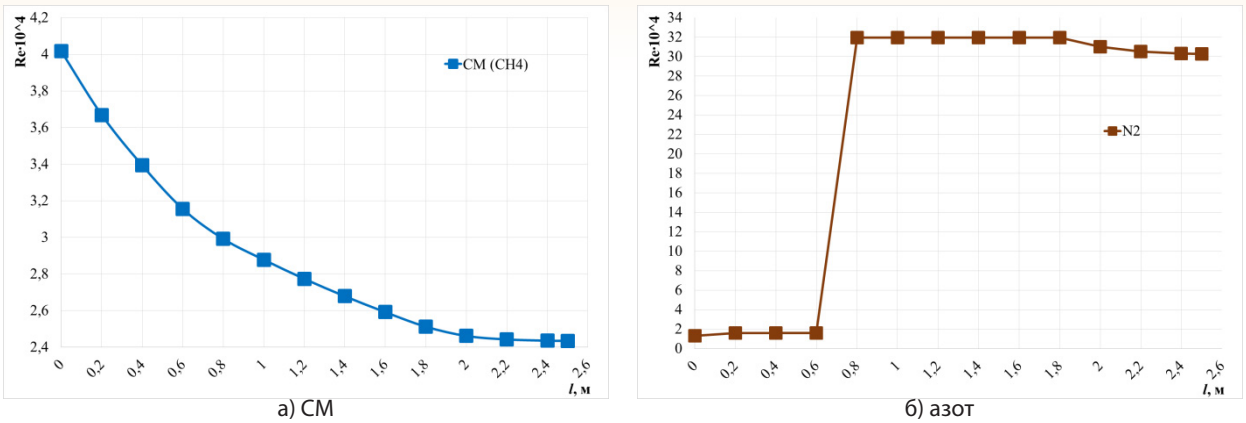
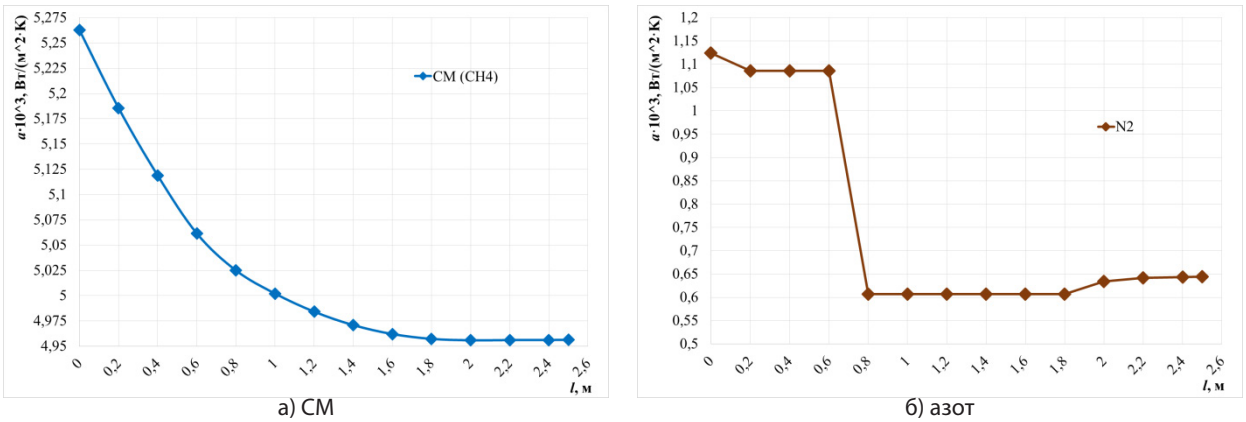


Рис. 3. Зависимость средней скорости трубных потоков ($v_{ср}$) СМ и азота от координаты по высоте намотки ((*l*) от входа в ТОА)



а) СМ б) азот

Рис. 4. Зависимость числа Рейнольдса трубных потоков (Re) от координаты по высоте намотки ((*l*) от входа в ТОА)



а) СМ б) азот

Рис. 5. Зависимость коэффициента теплоотдачи (а) потоков СМ и азота от координаты по высоте намотки ((l) от входа в ТОА)

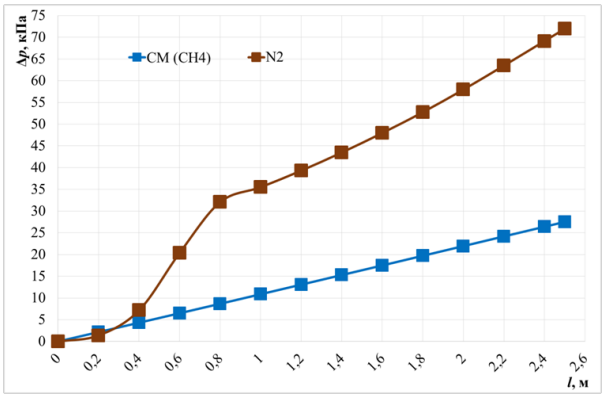


Рис. 6. Зависимость гидростатического сопротивления (Δp потоков СМ и азота от координаты по высоте намотки ((l) от входа в ТОА)

Таблица 3

Основные результаты параметров ТОА, полученные по итогам моделирования процесса охлаждения СМ

Параметр	Поток 1 (CH_4)	Поток 2 (N_2)
Расход газа, кг/сек	22,00	6,30
Тепловая нагрузка по потокам, кВт	1 460,37	1 460,37
Температура потока (вход), К	112,00	78,00
Температура потока (выход), К	91,98	110,44
Гидростатическое сопротивление, кПа	27,30	71,99
Длина труб в потоках, м	-	6 715,3
Высота намотки, м	2,50	
Наружный диаметр обмотки, м	0,73	
Полная длина труб в ТОА, м	6 715,35	
Площадь наружной поверхности, м^2	210,86	
Площадь внутренней поверхности, м^2	168,69	
Масса труб, кг	1 499,23	
Средняя длина трубы, м	13,43	
Число витков труб в слое	208,33	

Моделирование проводилось по методике, разработанной Смородиным А.И. [3] в системе ASPEN HYSYS (v 8.4).

2. Результаты моделирования

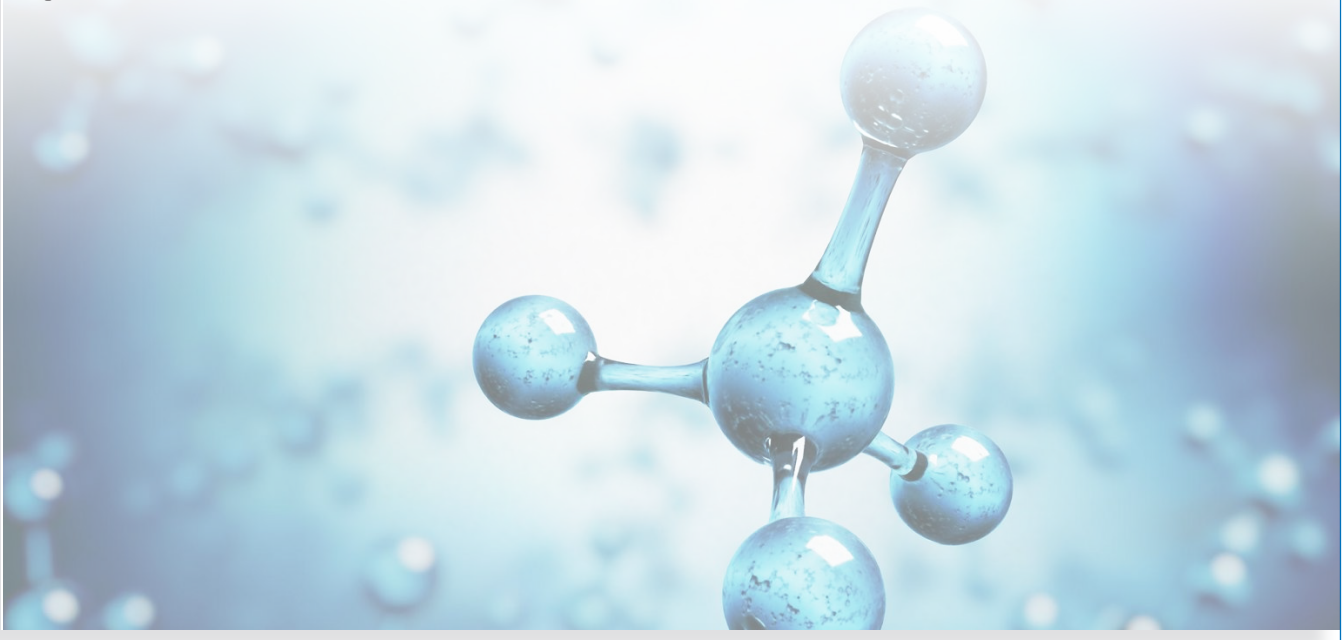
Результаты моделирования представлены на *рисунках 1-6* и в *таблице 3*.

Заключение

Полученные результаты параметров ТОА, построенного по прямоточной схеме реализации процесса охлаждении метана до температуры 94 К, позволяют утверждать, что для конкретных условий применения данная схема является рациональной и позволяет сохранить значительную величину температурного напора, а значит и высокие массогабаритные показатели аппарата и, вместе с тем, обеспечить режим работы без опасности образования твердой фазы на внешней поверхности разделительной стенки, контактирующей с охлаждающей средой, имеющей температуру много ниже температуры тройной точки охлаждаемой среды.

Литература

1. Александров А.А., Бармин И.В., Кунис И.Д., Чугунков В.В. Особенности создания и развития криогенных систем ракетно-космических стартовых комплексов «Союз» // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. №2. С.7-27.
2. Коробков А.А., Смородин А.И., Сергеев С.С., Кулик М.В., Садекова А.А. Анализ схемных решений процесса охлаждения криогенных продуктов, предназначенных для заправки ракеты-носителя // Известия Института инженерной физики, 2021. №2(60). С.16-21.
3. Антонов А.Н., Архаров А.М., Архаров И.А. Розеноер Т.М. и др. Машины низкотемпературной техники. Криогенные машины и инструменты: учебник для вузов; под общ. ред. А.М. Архарова и И.К. Буткевича. 2-е изд., испр. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. 536 с.
4. Хаузен Х. Теплопередача при противотоке, прямотоке и перекрестном токе. Пер. с нем. И.Н. Дулькина. М.: Энергоиздат, 1981. 383 с.
5. Коробков А.А., Кулик М.В., Редькин В.В., Сергеев С.С., Смородин А.И. Структурно-технологическая схема азотной системы охлаждения сжиженного метана для заправки ракеты-носителя среднего класса // Вестник Международной академии холода: ОО «МАХ», 2020. №4. С.27-36.
6. Редькин В.В., Смородин А.И., Сергеев С.С., Кулик М.В., Коробков А.А. Конкурирующие варианты структурно-технологических схем азотных адсорбционно-криогенных установок криотермовакуумных камер для термовакуумных испытаний космических аппаратов // Известия Института инженерной физики, 2020. №1(55). С.24-31.
7. Редькин В.В., Смородин А.И., Сергеев С.С., Кулик М.В., Коробков А.А. Математическая модель и методика расчета теплообменного оборудования базового варианта структурно-технологической схемы адсорбционно-криогенной установки // Известия Института инженерной физики, 2020. №2(56). С.25-32.
8. Смородин А.И., Сергеев С.С., Кулик М.В., Коробков А.А. Научно-методический аппарат расчета детандер-компрессорного агрегата структурно-технологической схемы адсорбционно-криогенной установки // Известия Института инженерной физики, 2020. №3(57). С.2-9.



УДК 658.562

О ПРОГНОЗИРОВАНИИ ОСТАТОЧНОГО СРОКА СЛУЖБЫ СОСУДОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

ON PREDICTION OF THE REMAINING SERVICE LIFE OF HIGH PRESSURE VESSELS BASED ON THE RESULTS OF TECHNICAL DIAGNOSTICS

Алексей Геннадьевич Попов
почётный работник науки и техники РФ
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
начальник управления прочностных исследований и технической диагностики МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967) 12-80-04
E-mail: upitd@iifmail.ru

Антон Владимирович Агеев
инженер-испытатель испытательной лаборатории МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967) 12-80-04
E-mail: upitd@iifmail.ru

Аннотация
В статье изложена методика прогнозирования остаточного срока службы сосудов высокого давления при заданном уровне надежности. Показано влияние разброса прочностных характеристик, определяемых при техническом диагностировании и нагрузки на продолжительность остаточного срока службы сосудов высокого давления.
Ключевые слова: прогнозирование, остаточный срок службы, сосуды высокого давления, техническое диагностирование.

Summary
The article describes a method for predicting the residual service life of high-pressure vessels at a given level of reliability. The influence of the scatter of strength characteristics, determined during technical diagnostics and loading, on the duration of the residual service life of high-pressure vessels is shown.
Keywords: forecasting, residual life, high-pressure vessels, technical diagnostics.

Экономически обоснованным является современный подход к эксплуатации промышленных объектов по техническому состоянию с поэтапным продлением назначенных ресурса и срока службы в соответствии с ГОСТ 33272-2015 [1].

При этом особое значение приобретает задача прогнозирования остаточного срока службы сосудов высокого давления (СВД), относящихся к категории особо опасных производственных объектов.

В целях определения возможности дальнейшей эксплуатации СВД и остаточного срока службы проводится техническое диагностирование, задачами которого является определение параметров технического состояния – толщины стенки и прочностных характеристик (предела прочности и предела текучести) металла [2].

Способность конструкции выдерживать рабочую нагрузку не разрушаясь, характеризуется коэффициентами запаса по пределу текучести $n_T(t_н)$ и пределу прочности $n_в(t_н)$, изменяющихся по времени и вычисляемых на основе измерительной информации, получаемой при техническом диагностировании и вычисляются по формулам

$$n_T(t_н)=\frac{\sigma_T(t_н)}{\sigma_p(t_н)}, \qquad n_в(t_н)=\frac{\sigma_в(t_н)}{\sigma_p(t_н)}, \quad (1)$$

где $\delta_p(t_н)$, $\delta_T(t_н)$, $\delta_в(t_н)$ – математические ожидания величин действующих напряжений, предела текучести и предела прочности металла стенки СВД на момент проведения диагностирования $t_н$.

Прочностные характеристики металла СВД $\delta_T(t_н)$, $\delta_в(t_н)$, имеющие технологический разброс на момент изготовления, изменяются в результате деградационных процессов происходящих при длительном воздействии эксплуатационных нагрузок (снижение предела прочности, предела текучести) [3].

При техническом диагностировании величины $\delta_T(t_н)$, $\delta_в(t_н)$ определяются путем замера твердости металла, статистической обработки и

вычисления прочностных характеристик по существующим корреляционным зависимостям, например [4].

Напряжения, действующие в стенке сосуда, являются так же случайной величиной, на которую оказывают влияние температурные условия эксплуатации и, как следствие, изменяющееся по величине давление газа, а так же коррозионные процессы в металле. Их величина, при условиях $D_в > 200$ мм и $S_{min} / D_в < 0{,}1$ при рабочем давлении p вычисляется по формуле для тонкостенных оболочек ГОСТ Р 34233.2-2017 [5]

$$\sigma_p(t_н) = \frac{p \cdot [D_н - S(t_н)]}{2 \cdot S(t_н)}, \quad (2)$$

где $S(t)$ – минимальная толщина стенки СВД измеренная при проведении технического диагностирования в момент времени t,

S_{min} – минимальная толщина стенки СВД в начале эксплуатации,

$D_в$, $D_н$ – внутренний и наружный диаметры цилиндрической части СВД, $D_в = D_н - 2*S(t)$.

При техническом диагностировании величина $S(t)$ определяется в результате статистической обработки данных ультразвуковой толщинометрии.

Предположим, что утонение стенки и снижение прочностных характеристик материала СВД по времени описываются линейными зависимостями вида

$$S(t) = S_0 - a \cdot t, \quad (3)$$

где a – скорость коррозии стенки СВД, вычисляемая по формуле

$$a = \frac{S_0 - S(t_н)}{t_н}, \quad (4)$$

$$\sigma_T(t) = \sigma_{T_0} - k_{\sigma_T} \cdot t, \quad \sigma_в(t) = \sigma_{в_0} - k_{\sigma_в} \cdot t, \quad (5)$$

где $k_{\sigma_T}, k_{\sigma_в}$ – скорости протекания процесса деградации, вычисляемые по формулам

$$k_{\sigma_T} = \frac{\sigma_{T_0} - \sigma_T(t_н)}{t_н}, \quad k_{\sigma_в} = \frac{\sigma_{в_0} - \sigma_в(t_н)}{t_н}, \quad (6)$$

где S_0 – номинальная толщина стенки СВД;

σ_{T_0}, $\sigma_{в_0}$ – предел текучести и предел прочности металла СВД на момент изготовления.

В работе [6] получена зависимость коэффициентов запаса прочностных характеристик от показателя надежности – вероятности отсутствия разрушения $P_Б$ и коэффициентов вариации, справедливой при нормальном законе распределения резерва прочности

$$n(t) = \frac{0{,}048 + 0{,}22 \cdot \left\{1 - \left[2 \cdot (1 - P_Б)\right]^{\frac{1}{5}}\right\} \cdot \sqrt{A_q^2(t) + A_r^2(t)}}{0{,}048 - A_r^2(t) \cdot \left\{1 - \left[2 \cdot (1 - P_Б)\right]^{\frac{1}{5}}\right\}^2}, \quad (7)$$

где $A_r(t)$, $A_q(t)$ – коэффициенты вариации прочностных характеристик и нагрузки соответственно.

В том случае, если коэффициенты вариации являются постоянными величинами, не изменяющимися во времени, для вычисления продолжительности сроков эксплуатации могут быть

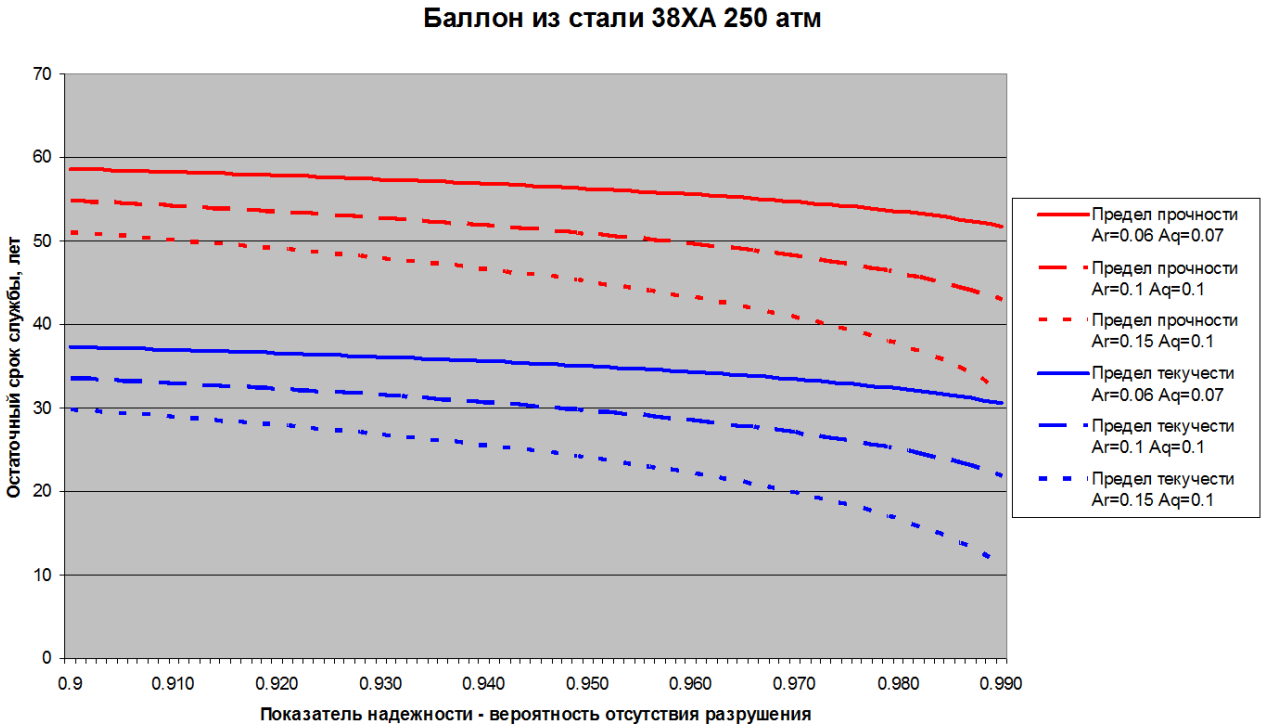


Рис. 1. Графики зависимости остаточного срока службы от показателя надежности (вероятности отсутствия разрушения) при различных коэффициентах вариации для баллонов из стали 38ХА с рабочим давлением 250 атмосфер по ГОСТ 9731-79 [7]

получены аналитические зависимости.

Для этого используем равенство зависимостей (1), (7), после подстановки в которые соотношений (2)-(6) получаем квадратные уравнения для продолжительности срока эксплуатации t_{nT}, соответствующего исчерпанию запаса по пределу текучести, и продолжительности срока эксплуатации $t_{nв}$ соответствующего исчерпанию запаса по пределу прочности, при заданных уровне показателя надежности $P_Б$ и коэффициентах вариации A_r, A_q

$$q_{aT}\cdot t_{nT}^2 - q_{bT}\cdot t_{nT} + q_{cT} = 0,\quad q_{aв}\cdot t_{nв}^2 - q_{bв}\cdot t_{nв} + q_{cв} = 0 \quad (8)$$

где $q_{aT} = 2\cdot b\cdot a\cdot k_{\sigma_T}$, $q_{bT} = -\left[2\cdot b\cdot(\sigma_{T_0}\cdot a + S_0\cdot k_{\sigma_T}) + p\cdot a\cdot h\right]$,

$q_{cT} = 2\cdot\sigma_{T_0}\cdot S_0\cdot b - p\cdot h\cdot(D - S_0)$, $q_{aв} = 2\cdot b\cdot a\cdot k_{\sigma_в}$,

$q_{bв} = -\left[2\cdot b\cdot(\sigma_{в_0}\cdot a + S_0\cdot k_{\sigma_в}) + p\cdot a\cdot h\right]$

$q_{cв} = 2\cdot\sigma_{в_0}\cdot S_0\cdot b - p\cdot h\cdot(D - S_0)$

$$b = 0.048 - A_r^2\cdot\varepsilon^2,\quad h = 0.048 + 0.22\cdot\varepsilon\cdot\sqrt{A_r^2 + A_q^2},$$

$$\varepsilon = 1 - \left[2\cdot(1 - P_Б)\right]^{0.2}$$

Соответствующие физическому смыслу корни уравнений (8) вычисляются по формулам

$$t_{nT} = \frac{-q_{bT} - \sqrt{q_{bT}^2 - 4\cdot q_{aT}\cdot q_{cT}}}{2\cdot q_{aT}},\quad t_{nв} = \frac{-q_{bв} - \sqrt{q_{bв}^2 - 4\cdot q_{aв}\cdot q_{cв}}}{2\cdot q_{aв}} \quad (9)$$

Остаточный срок службы СВД, как наработка от момента технического диагностирования до исчерпания запаса по пределу текучести $t_{ост\,T}$ или пределу прочности $t_{ост\,в}$ равен

$$t_{остT} = t_{nT} - t_н,\quad t_{ост\,в} = t_{nв} - t_н. \quad (10)$$

Влияние на продолжительность остаточного срока службы коэффициентов вариации прочностных характеристик металла СВД – баллонов и нагрузки, при различных их сочетаниях, характеризуют графики, приведенные на *рисунке 1*.

Из приведенных графиков следует, что чем меньше коэффициенты вариации (разброс прочностных характеристик и нагрузки), тем больше остаточный срок службы по пределу текучести и прочности СВД при одинаковом показателе надежности $P_Б$. Чем выше предъявляются требования по надежности, тем меньше остаточный срок службы баллонов.

Изложенная в статье методика предоставляет возможность обоснованно назначать продолжительность остаточного срока службы СВД по результатам технического диагностирования, обеспечивая при этом, требуемый уровень надежности.

Литература

1. ГОСТ 33272-2015. Безопасность машин и оборудования. Порядок установления и продления назначенных ресурса, срока службы и срока хранения. Основные положения.

2. Диагностика технических устройств / Г.А Бигус, Ю.Ф. Даниев и др. Под общ. ред. Г.А. Бигуса. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 615 с.

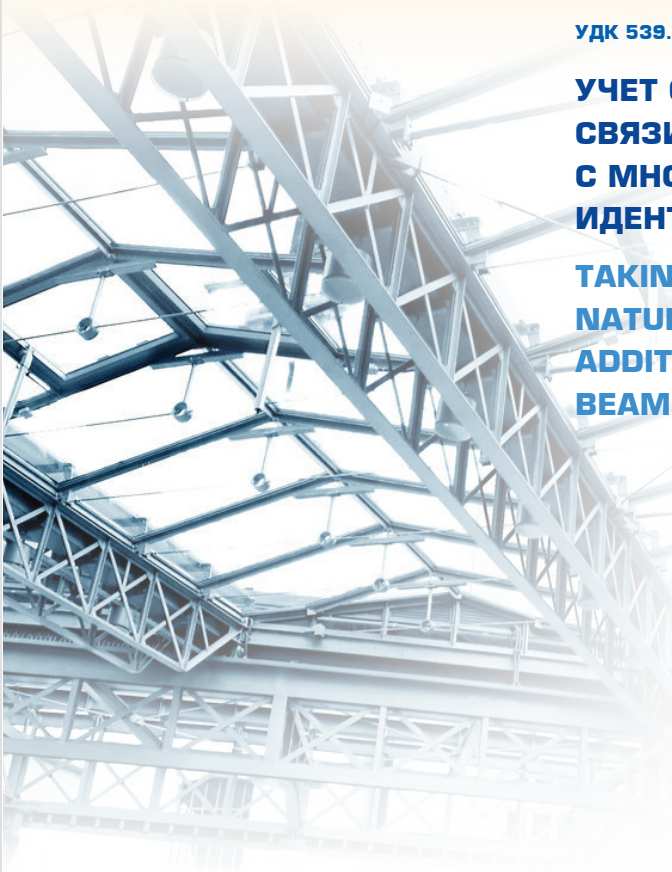
3. Горицкий В.М. Диагностика металлов. М.: Металлургиздат, 2004. 408 с.

4. И 1.2.1.02.019.1121-2016. Определение механических свойств металла оборудования атомных станций безобразцовыми методами по характеристикам твердости. Инструкция.

5. ГОСТ Р 34233.2-2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет цилиндрических и конических обечаек, выпуклых и плоских днищ и крышек.

6. Попов А.Г., Агеев А.В., Оленевская Е.О. Методика оценки надежности и прогнозирования остаточного ресурса сосудов высокого давления объектов ракетного вооружения для обеспечения длительной безаварийной эксплуатации по текущему техническому состоянию // Известия Института инженерной физики, 2018. № 3(49). С.17-20.

7. ГОСТ 9731-79. Баллоны стальные бесшовные большого объема для газов на $P_р \le 24{,}5$ МПа (250 кгс/см^2). Технические условия.



УДК 539.3

УЧЕТ ОДНОСТОРОННЕГО ХАРАКТЕРА СВЯЗИ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ОПОРЫ С МНОГОПРОЛЕТНОЙ БАЛКОЙ ПРИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПОДВИЖНОЙ НАГРУЗКИ

TAKING INTO ACCOUNT THE UNILATERAL NATURE OF THE CONNECTION OF THE ADDITIONAL SUPPORT WITH A MULTI–SPAN BEAM WHEN IDENTIFYING A MOVING LOAD

Виталий Тарасович Гришакин
кандидат технических наук
доцент кафедры Теоретической механики
Московский автомобильно-дорожный
государственный технический университет (МАДИ)
Адрес: 125319, Москва, Ленинградский пр., д. 64
Тел.: +7 (499) 155-03-38
доцент кафедры «С-01»
филиал «Стрела» МАИ (НИУ)
Адрес: 140180, Московская область, г.о. Жуковский,
ул. Жуковского, д. 8
Тел.: +7(495)556-90-11
E-mail: grichacin@yandex.ru

Аннотация
В статье исследована возможность определения состояния промежуточной дополнительной упругой опоры двухпролетной балки модели Тимошенко, находящейся под действием подвижной внешней силы, по внешним проявлениям параметров напряженно-деформированного состояния исследуемой балки. При этом в качестве исходных данных к решению задачи идентификации нестационарной нагрузки могут быть приняты измеренные с допустимой погрешностью перемещения как точки балки с фиксированной координатой, так и точки приложения подвижной силы. Приведены результаты численных экспериментов, проведенных на основе полученных зависимостей.
Ключевые слова: двухпролетная балка, дополнительная упругая опора, подвижная нагрузка, перемещения, идентификация.

Summary
The article investigates the possibility of determining the state of an intermediate additional elastic support of a two-span Timoshenko model beam, which is under the influence of a mobile external force, by the external manifestations of the strained-deformed state parameters of the beam under study. At the same time, as initial data for solving the problem of identifying a non-stationary load, both the points of the beam with a fixed coordinate and the points of application of the mobile force measured with an acceptable error of movement can be taken. The results of numerical experiments conducted on the basis of the obtained dependencies are presented.
Keywords: two-span beam, additional elastic support, movable load, displacement, identification.

Введение

Несмотря на наметившееся в последние годы увеличение сложности производимых инженерных сооружений, которое проявляется, в том числе, в наличии на поверхностях элементов конструкций большого количества особенностей, усложняющих применение аналитических методов расчета параметров напряженно-деформированного состояния нагружаемых объектов, актуальность именно аналитических подходов к изучению нестационарных колебаний конструкций с распределенными параметрами при воздействии импульсных нагрузок остается высокой. Не стал причиной снижения интереса к указанному подходу определения параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов конструкций и рост вычислительных возможностей современной техники, в результате которого применение численных методов расчета получило очень широкое распространение в современной инженерной практике.

Одной из причин сохранившейся востребованности в аналитических подходах к решению задач механики можно считать открывающуюся в результате такого решения возможность решения обратных задач, целью которых становятся, как правило, определение параметров внешнего нагружения, либо идентификация параметров состояния исследуемого объекта. В последнем случае исследоваться могут свойства как самого элемента конструкции, так и наложенных на него внешних связей. В настоящей статье исследована возможность определения состояния промежуточной дополнительной опоры двухпролетной балки модели Тимошенко, находящейся под действием подвижной внешней силы, по внешним проявлениям параметров НДС исследуемой балки.

Постановка и решение прямой задачи

Рассматривается шарнирно закрепленная по торцам балка модели Тимошенко [1], в точке S которой расположена дополнительная упругая опора (*рисунок 1*).

На балку действует подвижная нагрузка, смещение точки приложения которой описывается аргументом Дельта-функции: $P(t)\delta(x-V_0t)$. Реакция дополнительной упругой опоры на балку, жесткость которой постоянна в течение времени $T=l/V_0$ движения силы и обозначена как C_S, линейно зависит от прогибов точки балки с координатой x_S расположения дополнительной опоры (с практической точки зрения $x_S=l/2$), т.е. $R(t) = C_S \cdot w_S(t)$. Положительное направление реакции опоры на балку противоположно выбранному направлению оси Oz и в случае шарнирной связи опоры и балки может носить знакопеременный характер, а при одностороннем характере связи ее реакция на балку только положительна. Отметим, что односторонность приложения силы реакции опоры на балку возможна как в результате конструктивных решений, принятых при строительстве объекта, так и при частичном разрушении опоры, предполагавшей осуществление двусторонней связи балки с опорной поверхностью, что может послужить причиной дальнейшего быстрого разрушения всего сооружения.

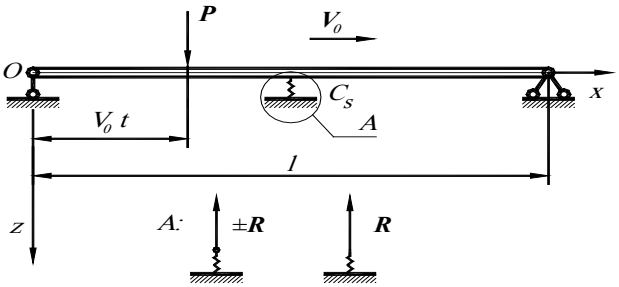


Рис. 1. Расчетная схема двухпролетной балки

Поставленная таким образом задача в рамках уточненной теории Тимошенко [1] приводит к необходимости решения системы дифференциальных уравнений

$$EI\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2}+k'FG\left(\frac{\partial w}{\partial x}-\psi\right)=\rho I\frac{\partial^2\psi}{\partial t^2};$$
$$k'G\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}-\frac{\partial\psi}{\partial x}\right)-\rho\frac{\partial^2 w}{\partial t^2}=q_z(x,t), \quad (1)$$

где ψ – угол поворота нормали от изгиба к нейтральной линии балки;

E и G – модули упругости первого и второго рода соответственно;

ρ – плотность материала балки;

F и I – площадь и момент инерции поперечного сечения балки;

k' – коэффициент сдвига, зависящий от формы поперечного сечения.

Функция поперечной нагрузки в рассматриваемом случае примет вид

$$q_z(x,t)=P(t)\delta(x-V_0t)-R(t)\delta(x-x_S). \quad (2)$$

Решение системы (1) традиционно ищут при нулевых начальных условиях и граничных условиях, отвечающих шарнирному опиранию балки, путем разложения функций w и ψ по формам свободных колебаний [2,3]. Отметим, что оценка влияния граничных условий на результаты решения системы уравнений (1) и качество проводимой идентификации нестационарной нагрузки, действующей на однопролетные балки различных теорий, приведена в работе [4].

В результате применения указанной методики, решение системы (1) относительно функции w примет форму:

$$w(x,t)=\int_0^t P(\tau)K_P^w(x,\tau,t-\tau)d\tau-\int_0^t w_s(\tau)K_R^w(x,t-\tau)d\tau, \quad (3)$$

где

$$K_P^w(x,\tau,t-\tau)=\frac{2}{\rho Fl}\sum_{k=1}^{\infty}\sin(\lambda_k V_0\tau)\sum_{i=1}^{2}C_{ik}\sin\omega_{ik}(t-\tau)\sin\lambda_k x,$$
$$K_R^w(x,t-\tau)=\frac{2C_s}{\rho Fl}\sum_{k=1}^{\infty}\sin(\lambda_k s)\sum_{i=1}^{2}C_{ik}\sin\omega_{ik}(t-\tau)\sin\lambda_k x,$$

$$\omega_{ik}^2=\frac{\left(a^2+c^2\right)\lambda_k^2+b^2-(-1)^i D_k}{2},$$

$$\lambda_k=\frac{k\pi}{l},\quad a=\sqrt{k'G/\rho};\quad b=a\sqrt{F/I};\quad c=\sqrt{E/\rho};$$
$$D_k=\sqrt{\left[\left(a^2+c^2\right)\lambda_k^2+b^2\right]^2-4a^2c^2\lambda_k^4},$$

$$C_{ik}=(-1)^i\frac{b^2+c^2\lambda_k^2-\omega_{ik}^2}{\omega_{ik}D_k};$$

$$i=1,\ 2.$$

Изучая с помощью формулы (3) перемещения точки S расположения упругой опоры, по-

лучим интегральное уравнение Вольтерра II-го рода для определения функции $w_S(t)$. Численное решение указанного уравнения возможно после его дискретизации по времени, что приводит к необходимости решения системы линейных алгебраических уравнений, которую в матричной форме можно представить следующим образом:

$$\mathbf{w} = \mathbf{A} \times \mathbf{q} - \mathbf{B} \times \mathbf{w}, \quad (4)$$

где матрицы **A** и **B** соответствуют дискретизированным по времени $m\Delta t$ ядрам интегральных уравнений K_P^w и K_R^w, а вектор **q** – функции поперечной нагрузки q_z. Решая уравнение (4) относительно вектора **w**, получим

$$\mathbf{w} = (\mathbf{B} + \mathbf{I})^{-1} \times \mathbf{A} \times \mathbf{q}, \quad (5)$$

где **I** – единичная матрица размера $m \times m$.

Приведенная математическая модель позволяет оценить вертикальные перемещения точки расположения дополнительной упругой опоры в предположении, что контакт опоры с балкой двусторонний. Для учета одностороннего характера связи в точке *S* необходимо обнулить отрицательные компоненты вектора реакции связи $R(t) = C_S \cdot w_S(t)$, т.е. выполнить условие $R(t) \geq 0$. Это условие можно реализовать как с помощью логического оператора *if* [5], встроенного в большинство современных программ для инженерных и научных расчетов, так и путем умножения вычисленного значения каждого *m*-го элемента вектора **w** на функцию Хэвисайда, аргументом которой является сам элемент w_m.

Численные эксперименты на основе приведенных зависимостей проводились для двупролетной балки в виде двутавра №33 ГОСТ8239-93 при следующих исходных данных:

- длина балки l=33 м;
- жесткость промежуточной опоры C_S=10^6 Н/м;
- величина действующей на балку подвижной силы P=1 кН;
- скорость движения силы V_0=50 м/с.

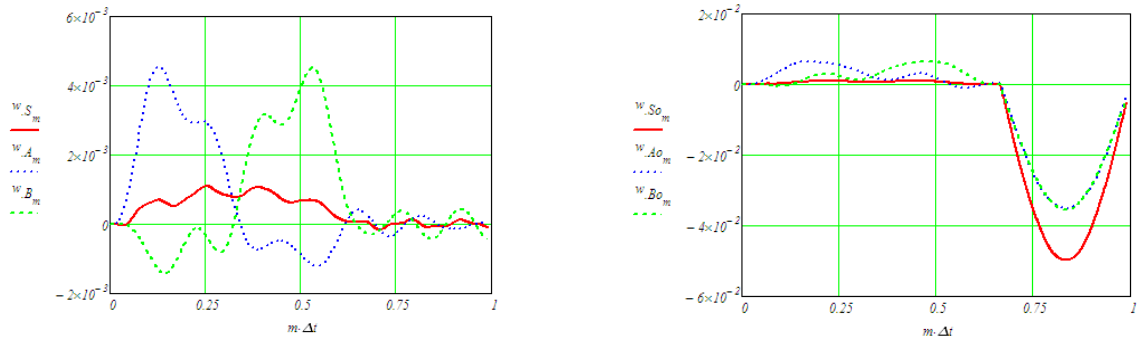
Результаты расчета функций $w_S(t)$, $w_A(t)$ и $w_B(t)$ перемещений точек с координатами x_S=$l/2$=16,5 м, x_A=$l/4$=8,25 м и x_B=$3l/4$=24,75 м при двустороннем характере связи приведены в виде графиков на *рисунке 2а*. Справа, на *рисунке 2б*, приведены результаты расчета перемещений тех же точек балки в случае, когда связь балки с дополнительной опорой односторонняя (неудерживающая).

Из *рисунка 2б* видно, что при неудерживающем характере связи в точке *S* перемещения этой точки балки после продвижения по ней подвижной силы *P* становятся существенно большими, чем в случае наложения двусторонней связи. Эффект многократного увеличения прогиба балки можно объяснить тем, что при одностороннем характере связи в точке *S* двухпролетная неразрезная балка может быть изучена как однопролетная, с приложенной в ее центре сосредоточенной силой $R(t)$, действие которой не прекращается некоторое время после продвижения по балке подвижной силы. Отметим, что более точное изучение колебаний рассматриваемой механической системы возможно при учете диссипации энергии колебаний, возникающих как в самой балке, так и в ее опоре. Рассмотрение же поставленной задачи на более длительном временном интервале потребует также учета ударного взаимодействия балки и дополнительной опоры.

Обратная задача и результаты идентификации

Постановки обратных к рассмотренной таким образом прямой задачи определения параметров НДС балки могут быть различными. Прежде всего, исследователя может интересовать вопрос идентификации внешнего подвижного нагружения по известным прогибам $w(x, t)$ некоторой точки балки или $w(V_0t, t)$ точки приложения нагрузки (прогиб под силой).

С целью определения состояния пролетного



а) б)

Рис. 2. Перемещения точек *S, A* и *B* при двусторонней (а) и односторонней (б) связи балки с дополнительной упругой опорой

строения возможно решение, например, следующих обратных задач:

- определение жесткости дополнительной упругой опоры по заданным параметрам НДС балки (такая постановка интересна в случае, когда дополнительная упругая опора может изменять свою жесткость в течение срока эксплуатации сооружения);
- исследование типа наложенной в точке S связи.

В последнем случае результатом рассмотрения задачи будет ответ на вопрос, является ли связь между балкой и дополнительной опорой удерживающей (двусторонней), или в результате эксплуатации конструкции и старения материалов связь стала носить односторонний характер. Такое изменение свойств рассматриваемой механической системы неизбежно приведет к увеличению параметров НДС балки, что видно из приведенных на *рисунке 2б* и *рисунке 4а* графиков, а значит, отрицательно скажется на эксплуатационных показателях всего пролетного строения.

Для решения задачи идентификации внешнего подвижного нагружения векторное равенство (5) необходимо решить относительно величины **q**:

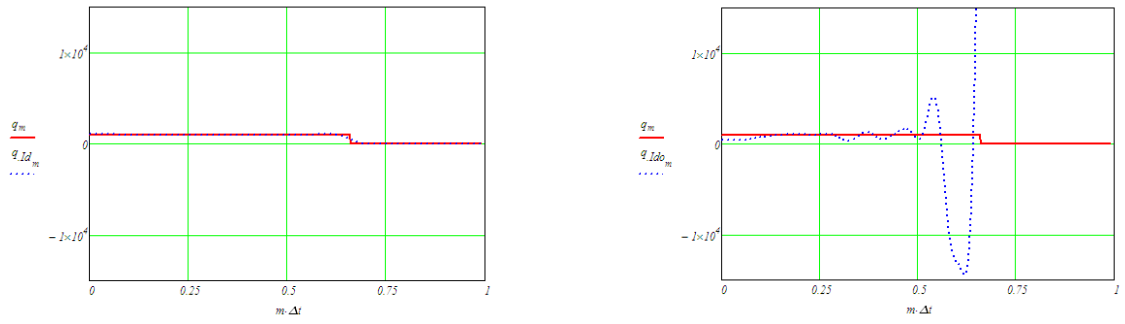
$$\mathbf{q_{Id}} = \mathbf{A}^{-1} \times (\mathbf{B} + \mathbf{I}) \times \mathbf{w} . \qquad (6)$$

Поставленная таким образом обратная задача относится к классу некорректных задач по Адамару по причине сингулярности матрицы **A**. Следовательно, для получения устойчивого решения уравнения (6) необходимо применение регуляризирующего алгоритма, перечень и методика применения которых приведена, например, в работе [2]. Отметим, что при решении всех поставленных в настоящей работе обратных задач процедура регуляризации проводилась на основе подхода, предложенного в работах [6, 7].

При решении задачи идентификации внешнего подвижного нагружения с целью сделать вывод о благополучности состояния пролетного строения, необходимо провести сопоставление идентифицированной нагрузки (6) с вектором **q**. Величина указанной нагрузки в этом случае зависит от свойств дефектометра, с помощью которого производится подвижное нагружение, и входит в исходные данные. Также задавать при решении задачи в этом случае необходимо измеренные с некоторой погрешностью Δ перемещения $w_S(t)$ точки S расположения на балке дополнительной упругой опоры. Отметим, что погрешность измерения во всех рассмотренных примерах решения обратных задач задавалась в пределах допускаемой при инженерных расчетах, т.е. $\Delta = 5\%$. Иллюстрация результатов, получаемых в случае применения такого подхода к балкам с двусторонней и односторонней дополнительными связями, приведена на *рисунке 3*.

Так, на *рисунке 3а* показан результат идентификации подвижной нагрузки, полученный при сохранении удерживающего характера связи в точке расположения дополнительной опоры. Справа, на *рисунке 3б* показан результат идентификации той же нагрузки в случае, когда связь балки и дополнительной упругой опоры односторонняя. Таким образом, имея так называемые эталонные результаты идентификации, полученные, например, перед введением строения в эксплуатацию, вывод об изменении характера связи можно сделать путем сопоставления вновь получаемых результатов с эталонными.

Более прогрессивным и производительным в случае решения поставленной таким образом задачи можно считать подход, основанный на определении состояния пролетного строения по величине перемещений точки приложения нагрузки $w(V_0 t, t)$, т.е. по вертикальным перемещениям самого дефектометра, применяемого для исследования объекта нагружения. В этом случае упомянутое устройство должно быть оборудовано специальными датчиками, позволяющими измерять указанные перемещения, либо их



а) б)

Рис. 3. Идентификация внешнего подвижного нагружения в случае двустороннего (а) и одностороннего (б) наложения связи в точке S

производные – скорости либо ускорения точки приложения силы. В последнем случае величина действующей на балку подвижной силы может с некоторыми допущениями быть получена путем умножения показаний датчика ускорений на массу дефектометра. Отметим, что скорость движения указанного устройства относительно балки V_0 во всех случаях постоянна и входит в набор исходных данных. Применение такого подхода позволяет избежать необходимости измерения перемещений каких-либо точек исследуемого объекта и оценить его состояние только по отклику на приложенную внешнюю нагрузку.

Результаты вычисления прогибов $w(V_0t, t)$ под внешней силой P и идентификации нагрузки в случае одно- и двустороннего характера связи в точке S приведены на *рисунке 4* в виде пунктирного и сплошного графиков. Отметим, что приведенные на *рисунке 4а* кривые могут служить исходными данными для решения обратной задачи только после наложения на них «зашумления» заданной величины Δ.

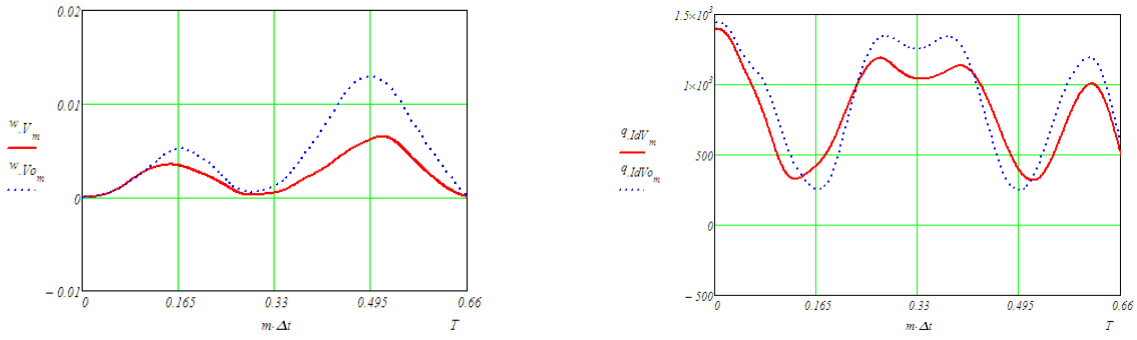
Эталонными кривыми, как и прежде, будем считать результаты, полученные при двустороннем характере связи опоры и балки. При этом пунктирными линиями на *рисунке 4* показаны графики, соответствующие одностороннему (неудерживающему) характеру связи в точке S. Оценка состояния изучаемой связи между балкой и упругой опорой в этом случае заключается в сравнении пунктирных кривых с эталонными, изображенными на *рисунке 4* сплошными линиями.

Заключение

В результате рассмотрения задачи предложен подход к оценке состояния пролетного строения аналитическими методами. Его совершенствование возможно путем более точного учета величины и характера приложения внешнего подвижного нагружения [8]. Также предлагаемая методика без принципиальных затруднений может быть обобщена на случай рассмотрения многопролетных неразрезных балок, имеющих несколько дополнительных упругих либо вязкоупругих опор подобно тому, как это выполнено на примере пластины в работе [9]. При этом учет диссипации энергии колебаний возможен как в материале опор, так и в материале балки. Однако задачи такого рода гораздо более сложные.

Литература

1. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле. М.: Физматгиз, 1967. 444 с.
2. Янютин Е.Г., Янчевский И.В., Воропай А.В., Шарапата А.С. Задачи импульсного деформирования элементов конструкций. Монография. Харьков: ХНАДУ, 2004. 392 с.
3. Янютин Е.Г. Импульсное деформирование упругих элементов конструкций. Киев: Наукова думка, 1993. 146 с.
4. Гришакин В.Т. Влияние граничных условий на качество идентификации нестационарной нагрузки на балку // Харьков: Автомобильный транспорт, 2013. №33. С. 120-128.
5. Кирьянов Д.В. Mathcad 15/Mathcad Prime 1.0. / СПб.: БХВ Петербург, 2012. 432 с.
6. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит-ры, 1986. 288 с.
7. Тихонов А.Н., Гончарский А.В., Степанов В.В., Ягола А.Г. Численные методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1990. 230 с.
8. Малиновский М.П., Борисов С.В., Карьялайнен А.Э. Проектировочный расчёт массовых характеристик автомобильного колеса // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура, 2020. №2(24). С.10-31.
9. Воропай А.В. Интегральные уравнения Вольтерра в некорректных задачах нестационарного деформирования пластин. Монография. Харьков: Изд-во «Лидер», 2018. 214 с.



а) б)

Рис. 4. Перемещения точки приложения подвижной нагрузки (а) и идентификация внешнего подвижного нагружения (б)

УДК 629.191

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ СОХРАНЯЕМОСТИ КОСМИЧЕСКИХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НИХ ТЕЛ ПРИРОДНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

METHODOLOGICAL APPROACH TO THE ASSESSMENT OF THE PRESERVATION OF SPACECRAFT UNDER THE INFLUENCE OF BODIES OF NATURAL ORIGIN ON THEM

Алексей Игоревич Алаторцев
доктор технических наук
начальник управления
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов
Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: 8 (903) 183-94-86
E-mail: alexalat@yandex.ru

Анатолий Григорьевич Чиграй
кандидат технических наук, доцент
ведущий научный сотрудник отдела
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов
Большой Ударный пер., д. 1а
Тел: 8 (926) 935-05-14

Фуров Андрей Николаевич
кандидат технических наук
старший преподаватель
филиал ВА РВСН им. Петра Великого (г. Серпухов)
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17
Тел.: 8 (925) 791-29-42
E-mail: afurov@gmail.ru

Аннотация
В статье рассматриваются вопросы оценки сохраняемости космических летательных аппаратов при воздействии на них тел природного происхождения (метеоритов). Описан методический подход, позволяющий произвести оценку сохраняемости космических летательных аппаратов.
Ключевые слова: воздействие, космический летательный аппарат, сохраняемость, тело природного происхождения.

Summary
The article deals with the issues of assessing the preservation of spacecraft under the influence of bodies of natural origin (meteorites) on them. A methodological approach is described that makes it possible to assess the safety of spacecraft.
Keywords: impact, spacecraft, preservation, body of natural origin.

В настоящее время достаточно точно описано движение космических летательных аппаратов (КЛА) по орбитам. Однако, стохастическое движение тел природного происхождения (ТПП) различных форм заставило ученых более тщательно подойти к оценке опасностей, исходящих от ТПП. При этом возникает необходимость оценки сохраняемости КЛА при перекрестном движении с ТПП, когда оно оказывает воздействие на КЛА. Сохраняемость КЛА должна оцениваться с вероятностной точки зрения принципиально новыми и современными научно-методическими подходами [1].

Анализ источников [2] показал, что в настоящее время целесообразно проведение исследований воздействия ТПП на элементы конструкции КЛА с помощью подхода, обеспечивающего решение подобных задач, основанного на применении модели «нагрузка-надежность». При исследовании под термином «нагрузка» следует понимать уровень функционального воздействия ТПП на КЛА, а под термином «надежность» – их способность к сопротивлению при приложенной нагрузке.

Существенное значение для решения поставленной задачи будет иметь расстояние от ТПП до КЛА. Данное расстояние необходимо принимать за стохастическое значение, которое подчиняется определенным законам распределения.

Время (T) в момент нахождения расстояния от ТПП до КЛА обозначим как беспрерывную стохастическую величину с плотностью распределения $f(t)$. Иная стохастическая величина J – расстояние от ТПП до КЛА, взаимосвя-

зано со временем T следующей зависимостью: $J = \varphi(T)$ [3]. Далее необходимо найти плотность распределения величины J. Рассмотрим отрезок времени (t_1, t_2), где находятся значения T, и $P(t_1<T<t_2) = 1$. Выбор подхода для решения определенной задачи зависит от поведения функции φ на отрезке (t_1, t_2). Нужно рассмотреть случай, где функция $j = \varphi(t)$ постоянно возрастает. Для этого случая величина T принимает множественные значения на отрезке (t_1, t_2), а стохастическая точка с координатами (T, J) перемещается только по кривой $j = \varphi(t)$. Плотность распределения величины J необходимо обозначить $g(j)$, и далее ее нужно определить. Для начала найдем функцию распределения величины J, где: $G(j) = P(J < j)$.

Зная геометрическую интерпретацию определения плотности распределения величины J, можно сказать что j – это расстояние от оси абсцисс до проведенной параллельной прямой. Для выполнения условия $J < j$, стохастическая точка (T, J) должна находиться на таком отрезке кривой, который находится ниже проведенной параллельной прямой. Для этого необходимо, чтобы стохастическая величина T находилась на отрезке оси абсцисс между t_1 и t, где t – абсцисса точки пересечения кривой $y = \varphi(t)$ и проведенной параллельной прямой.

В результате

$$G(j) = P(J < j) = P(t_1 < T < t) = \int_{t_1}^{t} f(t)dt. \quad (1)$$

Преобразуем верхний предел интеграла t через j: $t = \psi(j)$, где ψ – функция обратная функции φ. Следовательно

$$G(j) = \int_{t_1}^{\psi(j)} f(t)dt. \quad (2)$$

Продифференцировав интеграл (2) по переменной j, можно получить:

$$g(j) = G'(j) = f(\psi(j)) \left|\psi'(j)\right|. \quad (3)$$

В ряде случаев функция $j = \varphi(t)$ плавно возрастает или убывает, однако во многих случаях при практических расчетах она имеет вид стохастической кривой, где непрерывная стохастическая величина – это время T с плотностью распределения $f(t)$. Подобно ранее рассмотренному примеру иная стохастическая величина J – расстояние от ТПП до КЛА, и связанное со временем T зависимостью: $J = \varphi(T)$. Необходимо определить функцию распределения $G(j)$ величины J. Для этого следует провести прямую линию, которая параллельна оси абсцисс, на расстоянии j и необходимо выделить такие отрезки кривой $j = \varphi(t)$, где выполняется условие $J < j$. Таким отрезкам соответствуют отрезки оси абсцисс: $\Delta_1(j)$, $\Delta_2(j)$.

Наступление события $J < j$ равносильно попаданию стохастической величины T на любой один из указанных отрезков.

Следовательно

$$G(j) = P(J < j) = P((T \subset \Delta_1(j)) + \\ + (T \subset \Delta_2(j)) + \ldots) = \sum_i \mathrm{P}((T \subset \Delta_i(j)) = \sum_i \int_{\Delta_i(j)} f(t)dt \quad (4)$$

На основании описанного, функцию распределения величины $J = \varphi(T)$ следует определить выражением:

$$G(j) = \sum_i \int_{\Delta_i(j)} f(t)dt. \quad (5)$$

Продифференцировав $G(j)$ по величине j, входящей в пределы интегралов, можно получить плотность распределения величины J – расстояния от ТПП до КЛА.

Далее, не раскрывая основы поражающего действия ТПП и обладая информацией о плотности распределения расстояния от ТПП до КЛА, необходимо с помощью координатного закона поражения оценить сохраняемость КЛА при движении [4].

Для решения задачи оценки сохраняемости КЛА, необходимо использовать модель «нагрузка-надежность», учитывающую физические основы поражающего действия ТПП. Однако нужно знать плотности распределений уровней нагрузки $f_н(z)$ и надежности $f_н(z')$ КЛА. Уровень нагрузки z – это уровень воздействующего на КЛА поражающего действия, а уровень надежности z' – это критический уровень поражающего действия, когда КЛА поражается.

При получении аналитической зависимости плотности распределения нагрузки нужно найти набор возможных средств поражения и логику их применения. Когда средство поражения формирует единственный вид нагрузки, зависящий от расстояния, то ее необходимо представить следующей функцией $z = f(j)$. Далее при известной плотности распределения функции расстояния от ТПП до КЛА, определяем обратную функцию для величины $j = \xi(z)$, и получаем функцию плотности распределения нагрузки:

$$f_i(z) = g(\xi(z)) \left|\xi'(z)\right|. \quad (6)$$

Вероятность промаха КЛА $P_п$ можно выразить:

$$P_п = P(z' > z) = P(z' - z > 0). \quad (7)$$

Распределение уровней нагрузки и надежности, когда имеются корректные исходные данные, можно осуществлять аналитическими методами, и методами статистической обработки результатов испытаний.

Следует сказать, что для оценки сохраняемости КЛА необходимо рассмотреть два случая:

1. Функции плотности распределения $f_н(z)$ и $f_н(z')$ в большинстве случаев не пересекаются и

не имеют общей площади над осью абсцисс. В этом случае вероятность $P_{п}$ будет практически равна единице.

2. Функции плотности распределения $f_{н}(z)$ и $f_{н}(z')$ пересекаются, что характеризует возможность воздействия нагрузки, превышающей надежность КЛА. В данном случае вероятность поражения КЛА можно определить величиной общей площади кривых распределения.

Можно утверждать, что если уровень нагрузки z и уровень надежности z' являются случайными независимыми величинами, то плотность распределения пары стохастических величин (z,z') необходимо преобразовать через произведение плотностей вероятностей распределения уровней нагрузки $f_{н}(z)$ и надежности $f_{н}(z')$. Определим вероятность промаха КЛА:

$$P_{п} = \iint\limits_{(Ф)} f_{н}(z) f_{н}(z') dz dz', \qquad (8)$$

где Ф – область изменения z и z', которая соответствует промаху: $z \in 0..\infty$, $z' \in z..\infty$ или $z' \in 0..\infty$, $z \in 0..\ z'$.

Интеграл в выражении (8) необходимо представить:

$$P_{п} = \int_{0}^{\infty} f_{н}(z) dz \left[\int_{z}^{\infty} f_{н}(z') dz' \right], \qquad (9)$$

$$P_{п} = \int_{0}^{\infty} f_{н}(z') dz' \left[\int_{0}^{z'} f_{н}(z) dz \right]. \qquad (10)$$

Таким образом, в современных условиях оценка сохраняемости КЛА при движении во множестве случаев осуществляется при помощи имитационных методов моделирования, что требует значительных временных затрат, и знаний физического или координатного законов поражения. В первом случае при оценке сохраняемости КЛА полагаем, что радиус зоны поражения является известным, а во втором – задан уровень надежности, выраженный уровнем конкретного фактора поражения. В описанных случаях имитационное моделирование осуществляется при конкретных уровнях надежности. Описанный подход к оценке сохраняемости при движении перспективных КЛА подразумевает получение распределения нагрузки (уровня воздействующего фактора) $f_{н}(z)$ для конкретных условий применения. Это возможно осуществить, применив имитационное моделирование для требуемой траектории движения, что в последующем позволяет по зависимостям (9-10) провести оценку сохраняемости для любого КЛА с необходимым уровнем надежности. Описанный подход позволяет осуществить обоснование требований к разрабатываемым КЛА по надежности, когда на них воздействуют различные ТПП.

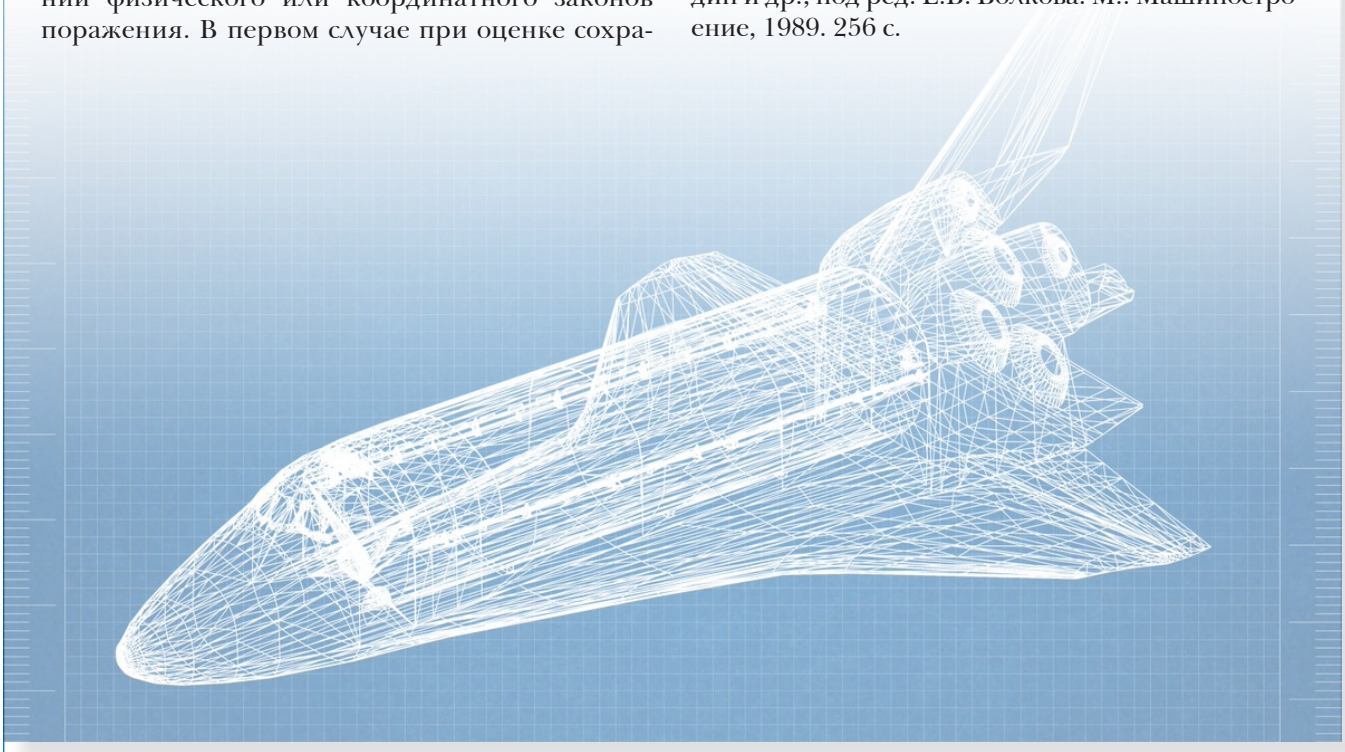
Литература

1. Баллистика ракет космического назначения: учебник / Н.Ф. Аверкиев, Д.А. Булекбаев, В.В. Салов. СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2020 412 с.

2. Основы теории полета летательных аппаратов: учебное пособие / Н.Ф. Аверкиев, С.А. Богачев, С.А. Васьков. СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2013. 242 с.

3. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: учебник для студ.вузов. М.: Издательский центр «Академия», 2003. 576 с.

4. Технические основы эффективности ракетных систем / Е.Б. Волков, В.З. Дворкин, А.И. Прокудин и др.; под ред. Е.Б. Волкова. М.: Машиностроение, 1989. 256 с.



УДК 621.3.083.1

МЕТОД ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ ЦЕПЕЙ ПОДКЛЮЧЕНИЯ НЕПРОВЕРЯЕМЫХ В ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРИБОРОВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЙ ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ В СПЕЦИАЛЬНЫХ КОМПЛЕКСАХ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

THE METHOD OF MEASURING CONTROL OF THE CONNECTION CIRCUITS OF DEVICES THAT ARE NOT TESTED IN OPERATION, PROVIDING AN INCREASE IN RELIABILITY IN SPECIAL MILITARY COMPLEXES

Андрей Викторович Аксёнов
начальник лаборатории
ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский Институт автоматики им. Н.Л. Духова» (ВНИИА)
Адрес: 127030, Москва, ул. Сущёвская, д. 22
Тел.: +7 (499) 978-78-03

Игорь Анатольевич Обыночный
кандидат педагогических наук
заместитель начальника факультета – начальник учебной части
филиал ВА РВСН имени Петра Великого (г. Серпухов)
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17
Тел.: 8 (4967)72-19-11
E-mail: Igorobynochnyy@mail.ru

Сергей Сергеевич Турков
кандидат технических наук
старший преподаватель
филиал ВА РВСН имени Петра Великого (г. Серпухов)
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17
Тел.: 8 (4967)72-19-11

Аннотация
В статье обосновывается недостаточность существующего объема электрического контроля цепей подключения непроверяемых в эксплуатации приборов (ЦНЭП) изделий, и излагается суть метода измерительного контроля ЦНЭП, для повышения надежности в специальных комплексах военного назначения.
Ключевые слова: изделие, непроверяемый в эксплуатации прибор, цепь непроверяемого в эксплуатации прибора, блок нагрузки, измерительный контроль.

Summary
The article substantiates the insufficiency of the existing volume of electrical control of the connection circuits of non-testable devices (TSNEP) products, and outlines the essence of the method of measuring control of TSNEP, to increase reliability in special military complexes.
Keywords: the product, the device that is not tested in operation, the circuit of the device that is not tested in operation, the load block, the measuring control.

Существуют такие изделия, функциональное назначение которых не предусматривает их применение в штатных ситуациях. При этом изделия должны быть работоспособны и находиться в постоянной готовности к применению. При эксплуатации (хранении) таких изделий проводится периодическая проверка их работоспособности.

В состав изделий, кроме прочего, входит ряд непроверяемых в эксплуатации приборов (НЭП), проверка работоспособности которых не проводится (запрещена) из соображения безопасности. НЭП - это пиротехнические или электромагнитные приборы однократного действия. Цепи срабатывания НЭП имеют активное сопротивление, а срабатывание НЭП обеспечивается при действии в этих цепях определенного значения тока в течение определенного времени [5].

Выдача команды на срабатывание НЭП осуществляется системой автоматики (СА) изделий по ЦНЭП. В состав ЦНЭП входят: провода, клеммы соединителей, контакты коммутационных приборов, резисторы, диоды, выходы электронных приборов автоматики (ЭПА) и др. Неисправность ЦНЭП может привести к несрабатыванию НЭП и, как следствие к отказу (неправильному функционированию) изделий, поэтому контроль работоспособности ЦНЭП является важной задачей, решаемой при проведении проверки работоспособности СИ.

При проведении проверки работоспособности изделий НЭП отключаются от ЦНЭП, после чего проверяется работоспособность ЦНЭП. В настоящее время проверка работоспособности ЦНЭП проводится в объеме контроля факта выдачи команды на срабатывание НЭП [3].

В *таблице 1* приведены сведения о возможных неисправностях ЦНЭП, причинах их возникновения и параметрах, по которым возможно гарантировано выявить отказ ЦНЭП [4].

Из *таблицы 1* видно, что проверка работоспособности ЦНЭП в объеме контроля факта выдачи команды на срабатывание НЭП:

- позволяет выявить неисправности ЦНЭП типа «обрыв ЦНЭП» и «короткое замыкание ЦНЭП»;
- не позволяет выявить неисправности ЦНЭП типа «изменение сопротивления ЦНЭП» и «изменение времени выдачи команды в ЦНЭП».

Неисправность типа «изменение сопротивления ЦНЭП» может привести к действию в цепи срабатывания НЭП недостаточного для его срабатывания значения тока. Неисправность типа «изменение времени выдачи команды в ЦНЭП» может привести к выходу из допустимого диапазона времени выдачи команды на срабатывание НЭП. Обе эти неисправности могут привести к несрабатыванию НЭП. В соответствии с вышеизложенным, существующий объем контроля работоспособности ЦНЭП является недостаточным [4].

Все перечисленные в *таблице 1* неисправности гарантированно выявляются по параметрам «сопротивление ЦНЭП» и «время выдачи команды на срабатывание НЭП», поэтому достоверная оценка работоспособности ЦНЭП будет обеспечиваться при проведении измерительного контроля ЦНЭП по двум параметрам:

- сопротивление ЦНЭП;
- время выдачи команды на срабатывание НЭП.

В состав ЦНЭП входят элементы, обладающие нелинейной вольт-амперной характеристикой (ВАХ), поэтому сопротивление ЦНЭП является нелинейным по току. Таким образом, для более точного измерения сопротивления ЦНЭП измерение должно проводиться при действии в ЦНЭП тока со значением, приближенным к значению тока срабатывания НЭП. Для обеспечения в ЦНЭП требуемого значения тока при проведении измерительного контроля ЦНЭП необходимо подключать в ЦНЭП нагрузку, имитирующую НЭП. Значение электрического сопротивления этой нагрузки должно быть приближено к значению электрического сопротивления НЭП. Так как в состав СИ входит несколько ЦНЭП, то нагрузки целесообразно объединить в блок нагрузок (БН). БН – имитатор НЭП, позволяющий провести измерительный контроль ЦНЭП при проверке работоспособности изделий.

При проведении проверки работоспособности изделий обеспечивается возможность измерения электрического напряжения на входе и выходе ЦНЭП, и сопротивления БН. Сопротивление ЦНЭП может быть измерено косвенным способом за счет измерения сопротивления БН и напряжений на входе и выходе ЦНЭП с последующим расчетом значения сопротивления ЦНЭП по выражению:

$$R_{ЦНЭП\,И} = \frac{U_{ВХ\,И} - U_{ВЫХ\,И}}{I} = \frac{(U_{ВХ\,И} - U_{ВЫХ\,И}) \cdot R_{БН}}{U_{ВЫХ\,И}} \quad (1)$$

где $R_{ЦНЭП\,И}$ – измеренное значение сопротивления ЦНЭП;

I – ток в ЦНЭП при проведении измерительного контроля ЦНЭП;

$U_{ВХ\,И}$ – измеренное значение напряжения на входе ЦНЭП;

$U_{ВЫХ\,И}$ – измеренное значение напряжения на выходе ЦНЭП;

$R_{БН\,И}$ – измеренное значение сопротивления БН, подключенного в ЦНЭП.

Измерение времени выдачи команды на срабатывание НЭП может проводиться методом прямого измерения за счет фиксирования времени появления (t_1) и пропадания (t_2) напряжения на выходе ЦНЭП и алгебраического вычитания этих величин [4].

В соответствии с вышеизложенным предста-

Таблица 1

Вид неисправности ЦНЭП	Причины возникновения неисправности	Параметр, по которому гарантированно выявляется неисправность
Обрыв ЦНЭП	Некачественный монтаж	Факт выдачи команды на срабатывание НЭП или сопротивление ЦНЭП
	Отказ элементов ЦНЭП	
Короткое замыкание ЦНЭП	Некачественный монтаж	
	Отказ элементов ЦНЭП	
Изменение сопротивления ЦНЭП	Некачественный монтаж	Сопротивление ЦНЭП
	Отказ элементов ЦНЭП	
Изменение времени выдачи команды на срабатывание НЭП	Отказ элементов ЦНЭП	Время выдачи команды на срабатывание НЭП

вим метод измерительного контроля ЦНЭП, который реализуется при выполнении следующих операций:

а) измерение сопротивления БН до выдачи команды на срабатывание НЭП (в начале проверки работоспособности изделий):

1) измерение сопротивления БН ($R_{БН\ И}$);

2) оценка работоспособности БН;

б) измерение напряжения на входе и выходе ЦНЭП, и измерение времени выдачи команды в ЦНЭП за счет проведения следующих операций при срабатывании ЦНЭП:

1) фиксирование времени появления напряжения на выходе ЦНЭП (t_1);

2) измерение напряжения на входе и выходе ЦНЭП ($U_{ВХ\ И}$, $U_{ВЫХ\ И}$);

3) фиксирование времени пропадания напряжения на выходе ЦНЭП (t_2);

в) расчет времени выдачи команды на срабатывание НЭП ($t_{ИМП\ И}=t_2-t_1$);

г) расчет значения электрического сопротивления ЦНЭП по *формуле 1*;

д) оценка работоспособности ЦНЭП.

Для принятия решения о работоспособности БН необходимо провести сравнение измеренного значения сопротивления БН с его контрольной нормой. Проведение измерительного контроля ЦНЭП с использованием неработоспособного БН запрещается.

Для принятия решения о работоспособности ЦНЭП необходимо провести сравнение:

- измеренного значения сопротивления ЦНЭП с его контрольной нормой;
- измеренного значения времени выдачи команды на срабатывание НЭП с его контрольной нормой.

Рисунок 1 показывает блок-схему алгоритма реализации метода измерительного контроля ЦНЭП.

Суть метода измерительного контроля ЦНЭП заключается в проверке работоспособности этих цепей путем измерения их электрического сопротивления и времени выдачи команды на срабатывание НЭП с последующим сравнением измеренных величин с их контрольными нормами.

Литература

1. Димов Ю.В. Метрология, стандартизация и сертификация: Учебник для вузов. 3-е изд. СПб.: Питер, 2010. 273 с.
2. Тюрин Ю. И., Чернов И. П., Крючков Ю. Ю. Физика. Ч.2. Электричество и магнетизм: Учебное пособие для технических университетов. Томск: Изд. Томского университета, 2003. 738 с.
3. Гордин Е.М., Митник Ю.Т., Тармалинский В.А. Основы автоматики и вычислительной техники. М.: Машиностроение, 1978. 304 с.
4. Логинов В.Н. Электрические измерения механических величин. М.: Энергия, 1970. 80 с.
5. Стрыгин В.В. Основы автоматики и вычислительной техники. М.: Энергоиздат, 1981. 376 с.

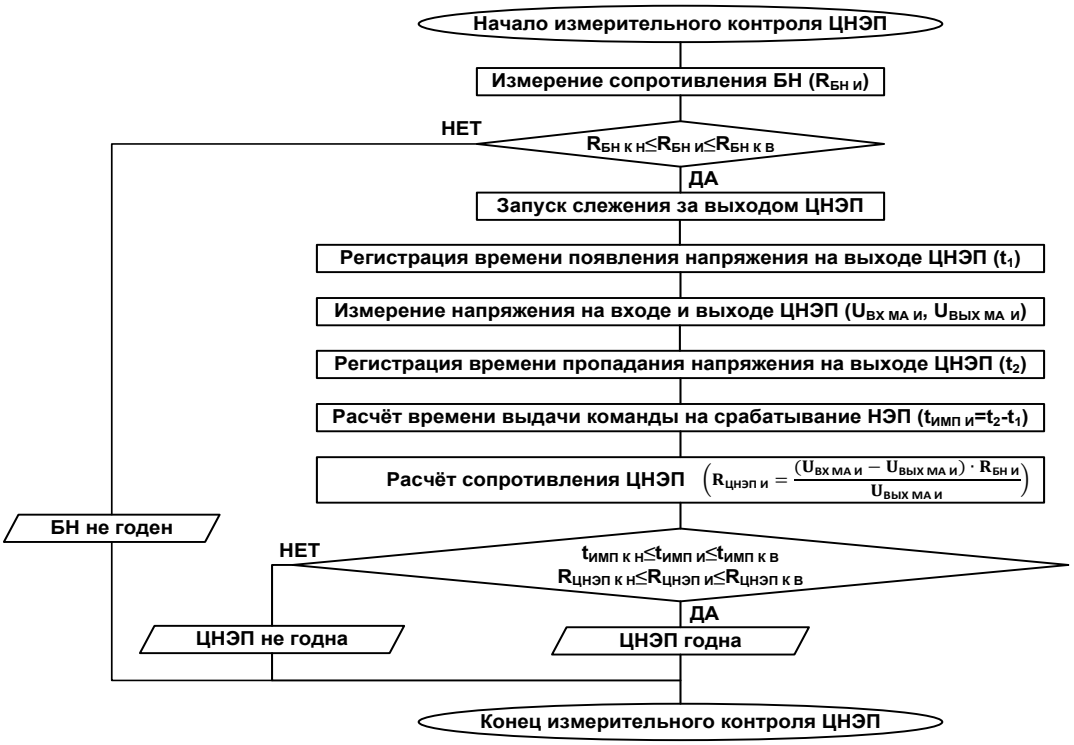


Рис. 1. Блок-схема алгоритма реализации метода измерительного контроля ЦНЭП

УДК 621.396

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКОГО СИГНАЛА ПО ЗАДАННОМУ ЧИСЛУ ТОЧЕК КОГЕРЕНТНОГО СТРОБИРОВАНИЯ

RECOVERY OF A PERIODIC SIGNAL FROM A SET NUMBER OF COHERENT STROBING POINTS

Аль Рубеи Мохаммед
аспирант кафедры радиотехники и радиосистем
Владимирский государственный университет
Адрес: 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87
Тел.: 8 (4922) 47-96-24

Александр Александрович Калюжный
аспирант кафедры радиотехники и радиосистем
Владимирский государственный университет
Адрес: 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87
Тел.: +7 (910) 093-78-54
E-mail: alex.kalyuzhnyy77@gmail.com

Александр Дмитриевич Поздняков
доктор технических наук, профессор
профессор кафедры радиотехники и радиосистем
Владимирский государственный университет
Адрес: 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87
Тел.: 8 (4922) 47-96-24
E-mail: 11alexpozd@mail.ru

Аннотация

В работе представлен способ восстановления периодического сигнала при когерентном стробировании. С использованием вычислительного метода определяется положение каждого отчета и его место в дискретной выборке при линейной и нелинейной трансформации временного масштаба. Для процедуры восстановления сигнала необходимо выбрать: количество дискретных отсчетов на периоде, временной интервал сбора данных, частоту стробирования и режим трансформации времени. Продемонстрировано, что использование режима нелинейного стробирования позволяет в несколько раз расширить диапазон возможностей использования частот дискретизации. В качестве результатов представлены окна окон исходных и восстановленных сигналов и таблицы их параметров.

Ключевые слова: восстановление сигнала, стробирование, аналого-цифровой преобразователь, трансформация временного масштаба, дискретизация.

Summary

The paper presents a method for restoring a periodic signal with coherent gating. Using the computational method, the position of each report and its place in the discrete sample are determined in the linear and nonlinear transformation of the time scale. For the signal recovery procedure, you must select: the number of discrete samples per period, the time interval of data collection, the gating frequency, and the time transformation mode. It is demonstrated that the use of the nonlinear gating mode makes it possible to expand the range of possibilities for using sampling frequencies several times. As the results, the windows of the windows of the original and restored signals and the tables of their parameters are presented.

Keywords: signal recovery, gating, analog-to-digital converter, time-scale transformation, sampling.

Разработка новых методов цифровой обработки сигналов расширяет возможности разработчиков по использованию более быстродействующих и точных алгоритмов косвенных измерений, позволяющих создавать виртуальные приборы и комплексы на основе персональных компьютеров, постепенно заменяя дорогостоящие автономные приборы.

При исследовании периодических сигналов для расширения диапазона рабочих частот измерительных приборов применяется метод синхронизированного стробирования, в котором восстановление формы сигнала осуществляется путем линейной интерполяции между отсчетами, положение которых синхронизируется с периодом исследуемого процесса так, чтобы получить нужный коэффициент трансформации временного масштаба и требуемый шаг считывания во времени.

В современном виртуальном приборе осуществляется обработка массива мгновенных отсчетов сигнала, получаемых с помощью стробирующего АЦП с регулируемой частотой дискретизации. Высокочастотный АЦП позволяет решать разные измерительные задачи на программном уровне и реализовать трансформацию временного масштаба путем вычислений.

Когерентное стробирование при линейной трансформации временного масштаба

Выполняется равномерное последовательное считывание соседнего значения сигнала через целое число периодов с шагом стробирования в соответствии с выражением

$$T_D=(nT_S\pm\Delta t)=(nT_S\pm T_S/N)=T_S(n\pm 1/N),$$

где n – целое число периодов сигнала между точками стробирования;

Δt – заданный шаг считывания по времени в пределах периода сигнала ($\Delta t<<T_S$);

N – целое число отсчетов за один полный цикл.

Восстановление сигнала осуществляется путем последовательного соединения отсчетов на оси времени. Цикл сбора данных составляет $M=nN$ периодов сигнала с шагом восстановленного сигнала $\Delta t=T_S/N$.

Когерентное стробирование при нелинейной трансформации временного масштаба

В этом режиме отношение $T_S/T_D=N/M$ – несократимая дробь, показывающая, какое целое число отсчетов N делается за один полный цикл длиною M периодов сигнала. Это условие когерентной выборки [4-7] с равномерной дискретизацией, позволяющей восстановить исходный сигнал путем перестановки отсчетов.

Отсчеты, получаемые на выходе стробирующего аналого-цифрового преобразователя (АЦП), располагаются в интервале восстанавливаемого периода сигнала в нужном порядке, который определяется выражением:

$$t_i = jT_D - iT_S,$$

где j – порядковый номер (целое число) отсчета;

i – целое число, для которого выполняется условие $TSi\geq jT_D-iT_S>0$;

T_S и T_D – периоды сигнала и дискретизации;

отношение $T_S/T_D=N/M$ – несократимая дробь, показывающая, какое число отсчетов N делается за один полный цикл M периодов сигнала.

Период дискретизации сигнала можно задать выражением: $T_D=T_SM/N$, где M – коэффициент трансформации временного масштаба, численно равный целому числу периодов сигнала, укладывающихся в интервале сбора массива неповторяющихся отсчетов. Дополнительные отсчеты дублируют данные полученные в первом цикле. Их разброс свидетельствует о нестабильности частоты дискретизации, или нестабильности частоты сигнала, а также о наличии джиттера и вандера.

Восстановление сигнала по заданному числу точек стробирования

Восстановление оцифрованного периодического сигнала во временной области в разных задачах может потребовать разные параметры, важнейшим из которых является число отсчетов на периоде. Для одних условий достаточно 3-х, для других требуется более 30 отсчетов. Используемый АЦП также вносит ограничения, обусловленные его реальной сеткой рабочих частот дискретизации. Дополнительно выбираются интервал сбора данных, а также режим трансформации времени.

Из отношения когерентности $T_S/T_D=N/M$ для заданного числа отсчетов N на периоде сигнала T_S находятся рабочие значения $T_D=T_SM/N$. Для удобных значений M оценивается полная длительность получения отсчетов MT_S и проверяется отношение N/M, которое должно быть несократимым. Для заданного N выбирается M и рассчитывается F_D, которое должно быть реализуемым. В противном случае берется новое M и F_D, или потребуется коррекция N. Восстановление сигнала 1000 МГц по 7 отсчетам для 4 соседних значений M и F_D показано на *рисунке 1* и в *таблице 1*.

В *таблице 1* для четырех комбинаций величин M и F_D показаны последовательности отсчетов, перестановка которых отличается. Восстановленные сигналы при этом одинаковые, т.е. считываются те же самые по фазе точки, но в другой последовательности.

Проведенные исследования метода перестановки показали, что для получения заданного числа отсчетов N необходимо реализовать следующую последовательность шагов:

1. Выбирается число отсчетов N на периоде сигнала T_S. Желательно чтобы это было простое число, дающее более широкие возможности выбора коэффициента трансформации или полного числа периодов сигнала M.

2. Оценивается допустимый интервал сбора данных в виде минимального и максимального значений M. Проверяется, для каких отноше-

Таблица 1

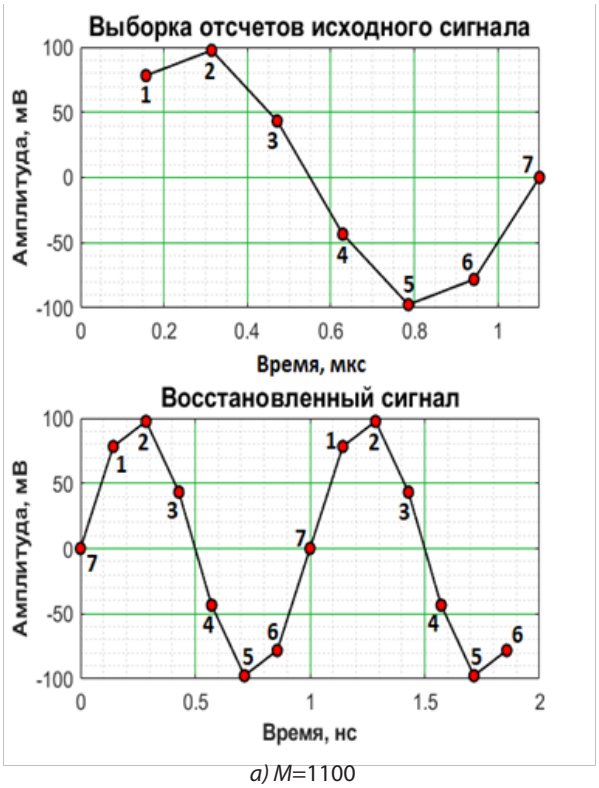
Последовательности отсчетов для разных M

Параметры	***Последовательности отсчетов для F_S=1000 [МГц], N =7***			
M	1100	1101	1102	1103
F_D [МГц]	6,363636	6,357856	6,352087	6,346328
Отсчеты	7-1-2-3-4-5-6	7-4-1-5-2-6-3	7-5-3-1-6-4-2	7-2-4-6-1-3-5

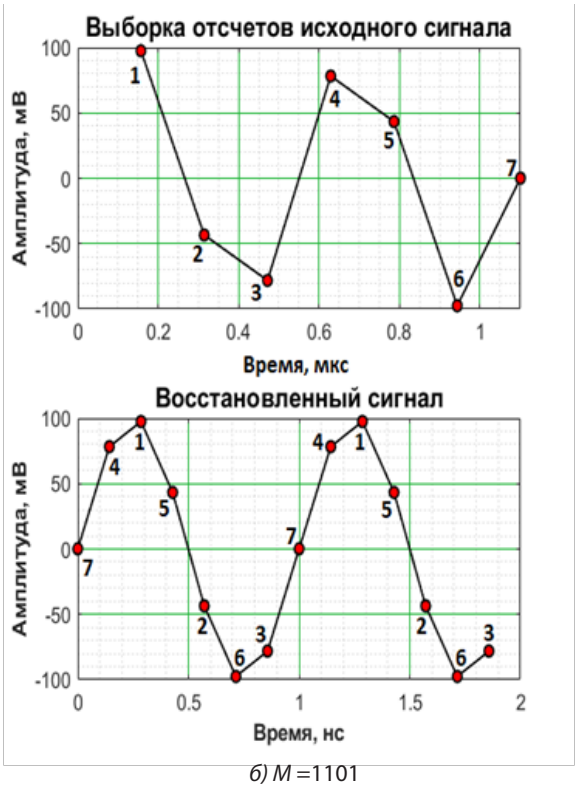
ний N/M выполняется требование простой несократимой дроби.

3. Для частоты сигнала F_S рассчитываются частоты равномерной дискретизации $F_D=F_SN/M$. Оцениваются доступные варианты F_D, хотя бы один из них должен быть реализуемым и совпадать с сеткой частот стробирующего АЦП.

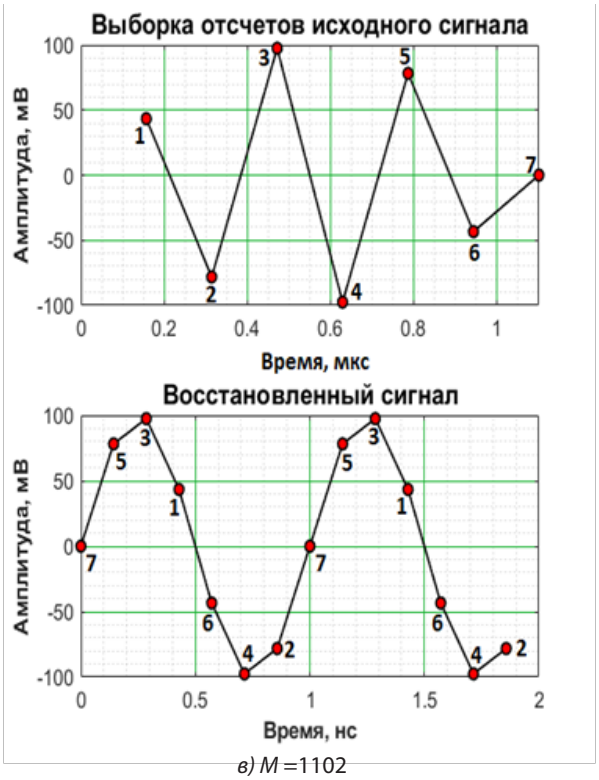
4. Для доступных вариантов проверяется и выбирается режим линейной или нелинейной трансформации временного масштаба.



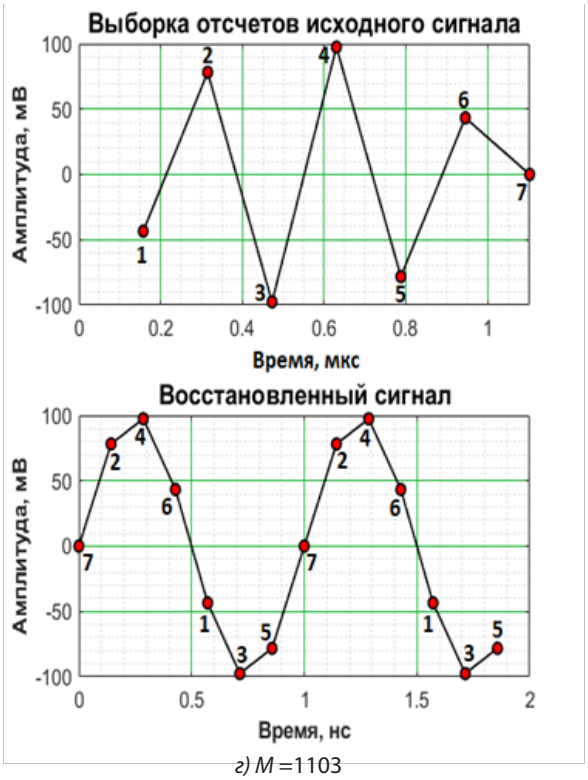
а) M=1100



б) M =1101



в) M =1102



г) M =1103

Рис. 1. Одинаковые восстановленные сигналы для близких *M*

5. Проверяются варианты рабочих значений $T_D=T_SM/N$ или $F_D=F_SN/M$. Если удобного варианта нет, то выбираются другие значения M и F_D. Может потребоваться коррекция N.

В качестве примера в *таблице 2* для $N=7$ приведены рабочие и нерабочие значения M в пределах: 5-30 и 100-125. Обозначения: Л – частота F_D линейного стробирования, Н – частота F_D нелинейного стробирования, С – частота F_D сократимого отношения N/M.

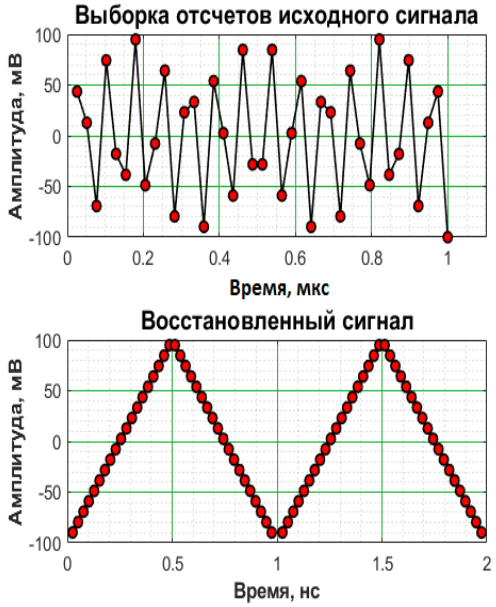
Для простого числа $N=7$ отношение N/M будет сократимым (С) при $M=7,14,21,28,\ldots,105,112,119$ и так далее. При значениях M соседних с сократимыми реализуется линейное стробирование, а на остальных - нелинейное. Таким образом, для 7 точек одно значение нерабочее, два значения для линейного и четыре – для нелинейного стробирования. Таким образом, в диапазоне рабочих частот дискретизации широкополосного стробирующего АЦП 14,3% составляют частоты с сократимым отношением N/M, а 28,6% и 57,1% составляют частоты с линейной и нелинейной трансформацией времени и несократимым N/M.

Таким образом, при 7 отсчетах на периоде, применение нелинейного стробирования рас-

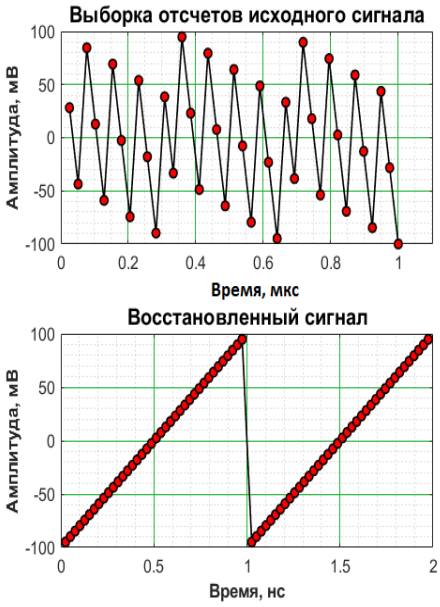
Таблица 2

Значения F_D для разных M

M	F_D (МГц)	Режим	M	F_D (МГц)	Режим
5	1400,00	**Н**	**100**	70,0000	**Н**
6	1166,66	**Л**	**101**	69,3069	**Н**
7	1000,00	**С**	**102**	68,6274	**Н**
8	875,000	**Л**	**103**	67,9611	**Н**
9	777,777	**Н**	**104**	67,3076	**Л**
10	700,000	**Н**	**105**	66,6666	**С**
11	636,363	**Н**	**106**	66,0377	**Л**
12	583,333	**Н**	**107**	65,4205	**Н**
13	538,461	**Л**	**108**	64,8148	**Н**
14	500,000	**С**	**109**	64,2201	**Н**
15	466,666	**Л**	**110**	63,6363	**Н**
16	437,500	**Н**	**111**	63,0630	**Л**
17	411,764	**Н**	**112**	62,5000	**С**
18	388,888	**Н**	**113**	61,9469	**Л**
19	368,421	**Н**	**114**	61,4035	**Н**
20	350,000	**Л**	**115**	60,8695	**Н**
21	333,333	**С**	**116**	60,3448	**Н**
22	318,181	**Л**	**117**	59,8290	**Н**
23	304,347	**Н**	**118**	59,3220	**Л**
24	291,666	**Н**	**119**	58,8235	**С**
25	280,000	**Н**	**120**	58,3333	**Л**
26	269,230	**Н**	**121**	57,8512	**Н**
27	259,259	**Л**	**122**	57,3770	**Н**
28	250,000	**С**	**123**	56,9105	**Н**
29	241,379	**Л**	**124**	56,4516	**Н**
30	233,333	**Н**	**125**	56,0000	**Л**



а)



б)

Рис. 2. Сигналы треугольной и пилообразной формы при 39 отсчетах

ширяет возможности использования частот дискретизации в три раза. При большем числе отсчетов выигрыш возрастает. Рассмотренный алгоритм выбора числа отсчетов и частоты стробирования может применяться для восстановления сигналов сложной формы (см. *рисунок 2*), а также импульсных последовательностей.

Выводы по результатам моделирования:

- Восстановление формы периодического сигнала при стробировании позволяет расширить диапазон рабочих частот дискретизации АЦП.
- Частоту дискретизации при нелинейной трансформации временного масштаба следует выбирать такую, для которой в периоде восстановленного сигнала укладывается целое число отсчетов с равномерным шагом.
- При стробировании можно восстанавливать периодические сигналы сложной формы.

Литература

1. Поздняков А.Д., Поздняков В.А. Автоматизация экспериментальных исследований, испытаний и мониторинга радиосистем. М.: Радиотехника, 2004. 208 с.

2. Поздняков А.Д., Поздняков В.А. Вычислительный метод восстановления формы дискретизированного периодического сигнала в компьютерных системах испытаний электронных средств // Проектирование и технология электронных средств,. 2008. № 1. С.57-61.

3. Калюжный А.А., Поздняков А.Д., Поздняков В.А. Восстановление периодического сигнала в виртуальном осциллографе при несинхронизированном стробировании // Проектирование и технология электронных средств, 2017. №3. С.52-56.

4. Степанов А.В., Матвеев С.А. Методы компьютерной обработки сигналов и систем радиосвязи. М.: СОЛОН-Пресс, 2003. 208 с.

5. A Tutorial in Coherent and Windowed Sampling with A/D Converters, RENESAS APPLICATION NOTE, AN9675, Rev.0.00, Feb 1, 1997.

6. A Theoretical View of Coherent Sampling, RENESAS APPLICATION NOTE, AN9705, Rev.0.00, Jun 1, 1997.

7. Patent WO2006086257A2 – Coherent interleaved sampling; Application number, PCT/US2006/003986. Publication date, Aug 17, 2006.

УДК 621.398.8

ЭФФЕКТИВНОСТЬ КАСКАДНОГО КОДИРОВАНИЯ ДАННЫХ С ВНУТРЕННИМИ ОРТОГОНАЛЬНЫМИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЯМИ

EFFICIENCY OF CASCADING DATA ENCODING WITH INTERNAL ORTHOGONAL SEQUENCES

Владимир Владимирович Зеленевский
почетный работник науки и техники РФ
доктор технических наук, профессор
профессор кафедры
филиал ВА РВСН им. Петра Великого (г. Серпухов)
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17
Тел.: 8 (905) 548-48-54
E-mail: Zelenevsky.Vladimir@gmail.com

Максим Сергеевич Черноусов
адъюнкт
филиал ВА РВСН им. Петра Великого (г. Серпухов)
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17
Тел.: +7 (920) 093-65-12
E-mail: chernousovm@mail.ru

Юрий Владимирович Зеленевский
доктор технических наук, доцент
научный сотрудник
ВА РВСН имени Петра Великого
Адрес: 143900, Московская обл.,
г Балашиха, ул. Карбышева, д.8
Тел.: +7 (903) 721-12-61
E-mail: sys1434@mail.ru

Андрей Борисович Наконечный
военнослужащий

Аннотация
В статье представлена структурная схема системы передачи данных с каскадным кодированием данных, которая, в отличи от известных, содержит блок кодового уплотнения недвоичных символов внешнего кода Рида-Соломона, содержится методика оценки эффективности предложенной платформы каскадного кодирования и численные параметры оптимальных кодов в условиях воздействия гармонических и импульсных помех.

Ключевые слова: преобразование символов недвоичного кода, уплотнение данных внутренним кодером, скремблирование группового сигнала, ортогональные последовательности, канальная скорость данных, критерий оптимальности кодирования, эффективность кодирования, оптимальная импульсная помеха.

Summary
The article presents a block diagram of a data transmission system with cascaded data encoding, which, unlike the known ones, contains a block of code compaction of non-binary characters of the external Reed-Solomon code, contains a method for evaluating the effectiveness of the proposed cascade coding platform and numerical parameters of optimal codes under the influence of harmonic and pulse interference.

Keywords: non-binary code character conversion, data compaction by internal encoder, group signal scrambling, orthogonal sequences, channel data rate, encoding optimality criterion, encoding efficiency, optimal pulse interference.

Известна структурная схема каскадного кодирования с параллельными ортогональными внутренними кодами [1], которая использует амплитудно-импульсную модуляцию несущего колебания групповым сигналом.

Ее недостатком является невозможность самосинхронизации сигнала по тактовой частоте, так как групповой сигнал может содержать пакеты как нулевых, так и единичных сигналов. Кроме того, амплитудно-импульсная модуляция сигнала уступает по помехоустойчивости фазовой модуляции.

Для устранения указанных недостатков предлагается структурная схема систем передачи с кодовым уплотнением данных (*рисунок 1*), которая содержит на передающей стороне:

- внешний кодер в составе недвоичного кодера Рида-Соломона (*Р-С*) и блока преобразования кодовых символов (*БПК*);
- внутренний кодер в составе блока уплотнения (*БУ*) данных и генератора ортогональных последовательностей Уолша-Адамара $Wal_i(t)$;
- модулятор группового сигнала в составе первого фазового модулятора ($ФМ_1$) и второго фазового модулятора ($ФМ_2$), при этом $ФМ_1$ осуществляет модуляцию несущего колебания

генератора $Г_1$, а $ФМ_2$ осуществляет скремблирование выходного сигнала $ФМ_1$ псевдослучайной последовательностью (*ПСП*), которая формируется генератором *ПСП* ($ГПСП_1$);

- генератор тактовых импульсов ($ГТИ_1$), который осуществляет тактовое управление кодера Рида-Соломона, генераторов $Wal_i(t)$ и *ПСП*.

На приемной стороне содержится:

- блок приема сигнала (*БПС*), который выделяет несущую информационного сигнала, тактовые импульсы и подстраивает с точностью до фазы генератор гармонического колебания $Г_2$;
- генератор тактовых импульсов ($ГТИ_2$), который обеспечивает тактовую синхронизацию приемного тракта;
- генератор *ПСП* ($ГПСП_2$), который обеспечивает дескремблирование группового сигнала;
- информационный демодулятор (*ИДМ*), который осуществляет выделение исходного группового сигнала;
- корреляционный декодер (*КДК*), который осуществляет корреляционную обработку в целом группового сигнала на длине ортогональных последовательностей Уолша-Адамара и выделяющий на своем выходе *K*-разрядный недвоичный символ кода Рида-Соломона;
- генератор полярных ортогональных последовательностей Уолша-Адамара $Wal_i^{(П)}(t)$;
- дешифратор (*DC*), который формирует унитарные символы недвоичного кода Рида-Соломона (0, 1, … q_{i-1});
- декодер кода Рида-Соломона (*ДР-С*), на выходе которого формируются принятые данные.

Избыточное (помехоустойчивое) кодирование данных предполагает при фиксированном времени передачи сообщения ($T=const$) постоянство энергии сигнала ($E_s=const$), затраченной на передачу, и уменьшение скорости кодирования данных в канале радиосвязи в

$$R_k = \frac{K \log_2 q}{NnK_s} \text{ раз,}$$

где K – число информационных символов недвоичного кода Рида-Соломона;
N – длина кода Рида-Соломона;
q – основание недвоичного кода Рида-Соломона;
n – длина ортогональной последовательности Уолша-Адамара (в нашем случае $n=\log_2 q$);
K_s – коэффициент расширения спектра сигнала, равный $K_s=B/N$, а B – длина псевдослучайной последовательности, которая генерируется $ГПСП_1$ и $ГПСП_2$. Уменьшение скорости кодирования R_k при $T=const$ потребует расширение полосы пропускания радиоканала в R_f раз, где $R_f=1/R_k$.

Однако при уменьшении отношения K/N минимальное кодовое расстояние кода Рида-Соломона увеличивается, что вызывает рост помехоустойчивости кода Рида-Соломона и увеличение длины пакета ошибок, который может быть исправлен. Увеличение коэффициента K_s способствует повышению помехоустойчивости радиоприемника по отношению к стационарным и импульсным помехам.

Таким образом, налицо противоречивые требования к параметрам кодирования данных. С одной стороны, значение R_k необходимо увеличивать для уменьшения частотных затрат по полосе пропускания, а с другой стороны значение R_k необходимо уменьшать для повышения помехоустойчивости радиоканала.

Очевидно, существуют некоторые оптимальные параметры помехоустойчивого кодирования, которые обеспечивают минимальные частотные затраты при фиксированных требованиях на помехоустойчивость (вероятность битовой ошибки $P_b=const$).

Критерий оптимальности, который характеризует эффективность кодирования данных в канале передачи, запишем в виде

$$\max_{K,N,K_s} \frac{K \log_2 q}{NnK_s} P_q \text{ при } P_b=f(P_q)=const,$$

где $P_q=f(N,\ h_o^2,\ K_s)$ – вероятность ошибочного приема недвоичного символа кода Рида-Со-

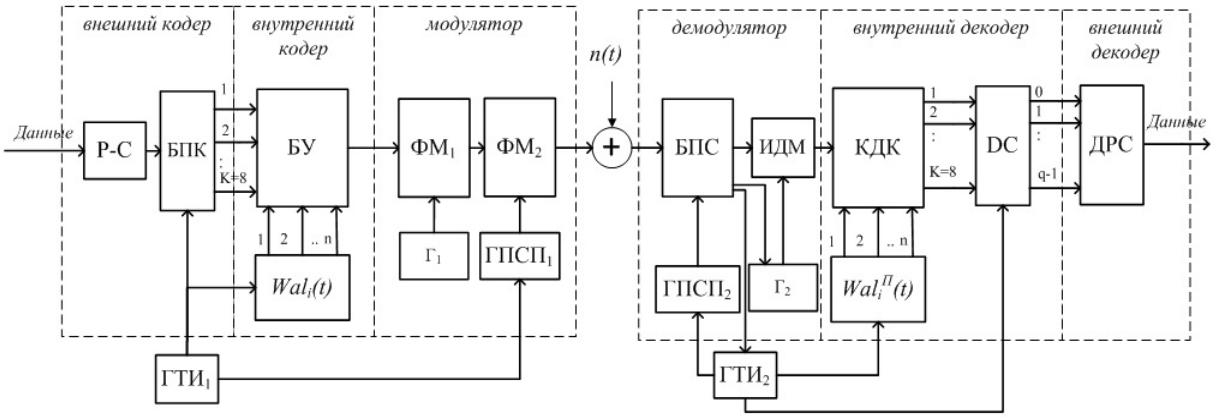


Рис. 1. Структурная схема систем передачи с кодовым уплотнением данных

ломона на выходе корреляционных декодеров (внутреннего декодера);

$$P_b = \frac{1}{2N}\sum_{i=T_n+1}^{N} C_N^i P_q^i i(1-P_q)^{N-i}.$$

При воздействии импульсных помех

$$P_q = 1-[1-1{,}1286\rho \int_{\left(\frac{P_n}{2P_c\rho B}+\frac{1}{nh_b^2}\right)^{-0{,}5}}^{\infty} e^{-t^2}dt]^n,$$

При воздействии узкополосной гармонической помехи

$$P_q = 1-[1-1{,}1286 \int_{\left(\frac{P_n}{2P_c B}+\frac{1}{nh_b^2}\right)^{-0{,}5}}^{\infty} e^{-t^2}dt]^n.$$

Обозначим

$$\nu = 10\ \lg\frac{K\log_2 q}{NnK_s}P_q$$

и, используя выражение для вероятностей P_q и P_b, определим значение показателя эффективности ν, *дБ* для группы недвоичных кодов Рида-Соломона [2].

Анализ результатов, представленных в *таблице 1*, показывает:

- при P_b=*const* существует недвоичный код Рида-Соломона с наибольшей эффективностью, имеющий параметры N=256, K=112, исправляющий T_n=72 недвоичных ошибочно принятых символов (пакет двоичных ошибок $T_П$=576 двоичных символа);

Таблица 1

Эффективность недвоичных кодов Рида-Соломона при $\log_2 q=n=8$

Параметры кодов Рида-Соломона q=256	P_b=5*10^{-4}		P_b=5*10^{-6}	
	P_q	ν, дБ	P_q	ν, дБ
N=256; K=224; T_n=16; $T_П$=128 дв. с.	0,037	-17,91	0,0238	-19,82
N=256; K=160; T_n=48; $T_П$=384 дв. с.	0 ,133	-13,813	0,109	-14,68
N=256; K=128; T_n=64; $T_П$=512 дв. с.	0,185	-13,35	0,157	-14,06
N=256; K=112; T_n=72; $T_П$=576 дв. с.	0,2128	-13,321	0,182	-13,9998
N=256; K=96; T_n=80; $T_П$=640 дв. с.	0,2399	-13,47	0,20767	-14,0899

- при уменьшении скорости кодирования K/N длина пакета исправляемых двоичных символов увеличивается;
- для лучшего недвоичного кода (256, 112) при воздействии импульсной помехи вероятность P_b=5*10^{-4} обеспечивается при n=8; B=16; $K_s=\frac{16}{8}=2$; $h_b^2=0{,}7$; $\frac{P_n}{P_c}=4{,}9$; ρ=0,15136, а вероятность P_b=5*10^{-6} обеспечивается при n=8; B=16; $K_s=\frac{16}{8}=2$; $h_b^2=0{,}7$; $\frac{P_n}{P_c}=4{,}1$; ρ=0,15136;
- при скважности импульсной помехи ρ=0,15136 вероятность P_b достигает максимального значения, а увеличение или уменьшение ρ ведет к уменьшению P_b, т. е. скважность ρ=*0,15136* является оптимальной (импульсная помеха наносит наибольший ущерб) для данных параметров кодирования данных;
- при ρ=0,0679 вероятность P_b=5*10^{-6} обеспечивается для n=8; B=16; $K_s=\frac{16}{8}=2$; $h_b^2=0{,}7$; $\frac{P_n}{P_c}=4{,}9$;
- для лучшего недвоичного кода (256, 112) при воздействии гармонической помехи вероятность P_b=5*10^{-4} обеспечивается при n=8; B=16; $K_s=\frac{16}{8}=2$; $h_b^2=0{,}5035$; $\frac{P_n}{P_c}=5$ и при n=B=8; K_S=1; $h_b^2=1{,}0186$; $\frac{P_n}{P_c}=3{,}5$, а вероятность P_b=5*10^{-6} обеспечивается при n=8; B=16; K_S=2; $h_b^2=0{,}60256$; $\frac{P_n}{P_c}=5$.

Таким образом, каскадное кодирование данных с ортогональными кодами, в отличие из известных платформ кодирования, позволяет:

- повысить помехоустойчивость системы передачи при битовом отношении сигнал/шум $h_b^2 \le 1$ (0 *дБ*), отношении помеха/сигнал $\frac{P_n}{P_c} \ge 3$ и коэффициенте расширения спектра сигнала K_s=2;
- при оптимальных параметрах кодов Рида-Соломона (N=256, K=112) длина пакета исправляемых двоичных ошибок составляет 576 символов.

Литература

1. Зеленевский В.В., Зеленевский Ю.В., Зеленевский А.В., Дурнов А.С. Статистические характеристики системы передачи с кодовым уплотнением данных при воздействии гауссова шума// Электросвязь, 2018. №7. С.42-45.

2. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. 2-е изд., испр. Пер. с англ. М.: Издат. дом «Вильямс», 2017. 1104 с.

УДК 621.309

ПРИЦЕЛЬНАЯ ШУМОВАЯ ПОМЕХА РАДИОСИСТЕМАМ С ШИРОКОПОЛОСНЫМИ СИГНАЛАМИ

SIGHTING NOISE JAMMING RADIO SYSTEMS WITH BROADBAND SIGNALS

Александр Ильич Куприянов
доктор технических наук, профессор
профессор кафедры
Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)
Адрес: 125993, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4
Тел.: 8 (499) 158 49 33
E-mail aik125167@mail.ru

Аннотация
Рассматривается влияние ширины спектра прицельной по частоте шумовой помехи для противодействия системам с широкополосными сигналами.
Ключевые слова: коэффициент подавления, помехоустойчивость, помехозащищенность, радиоэлектронное противодействие, широкополосные системы.

Summary
The impact of the spectrum width of the sighting on the frequency of noise interference to counteract systems with broadband signals is considered.
Keywords: suppression factor, interference resistance, electronic response, interference, broadband systems.

Расширение спектра сигнала по сравнению с шириной спектра переносимого этим сигналом информационного сообщения используется в радиоэлектронных системах разных классов и разного функционального назначения. Такие принципиальные решения при выборе структуры сигнала характерны как для систем передачи информации (связи, передачи данных), так и для систем извлечения информации (радиолокации, радионавигации). И все эти системы, по современным воззрениям, могут быть объектами радиоэлектронного противодействия. Поэтому едва ли нужно приводить тривиальный перечень всех мыслимых информационных систем, использующих методы формирования и обработки широкополосных радиосигналов. Также как и перечислять все классы помех, используемых для радиоэлектронного противодействия в современных условиях информационного конфликта. Поэтому в данной статье рассматриваются особенности организации подавления широкополосных систем (радиосистем с широкополосными сигналами) шумовыми помехами, прицельными по частоте, но не согласованными с подавляемым сигналом по ширине спектра. Такой подход позволяет существенно снизить требования к станциям радиоэлектронного подавления систем и средств противника в информационном конфликте, а также к средствам оперативной разведки параметров подавляемого радиосигнала.

Современные широкополосные системы используют сигналы с расширением спектра (сигналы с расширением полосы обеспечивают худшие не лучшие показатели помехоустойчивости и помехозащищенности [1]). Такие сигналы образуются в результате модуляции несущего колебания специальной расширяющей функцией $g(t)$ не зависящей от информационного сообщения (*рисунок 1*).

Энергетический спектр сообщения $C(t)$ сосредоточен в полосе ΔF. Примерно в такой же полосе сосредоточен спектр сигнала после первого модулятора (спектр сигнала на несущей). После перемножения с расширяющей функцией формируется широкополосный сигнал $S(t)$. Спектр этого сигнала формируется как свертка спектров сигнала после первого модулятора и спектра расширяющей функции. Ширина спектра сигнала $S(t)$ оказывается много больше ширины спектра сообщения $\Delta f_c >> \Delta F$.

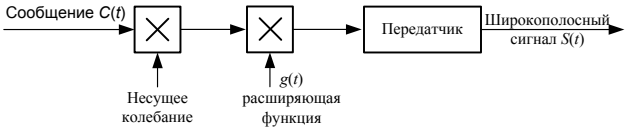


Рис. 1. Формирование сигнала с расширением спектра

Справедливо считается [1, 2], что широкополосные сигналы обеспечивают высокую помехозащищенность использующих их систем передачи и/или извлечения информации. При этом рассматривают различные показатели помехозащищенности, исходя из основных характеристик и целевых функций информационных радиоэлектронных систем, которые вынуждены функционировать в условиях угроз их устойчивости к организованным помехам. Более или менее универсальным показателем помехозащищенности и, соответственно, эффективности работы в условиях радиоэлектронного противоборства, может служить коэффициент подавления РЭС, определяемый как отношение мощностей организованной помехи и подавляемого ею сигнала [3]:

$$k_{\text{п}} = \frac{P_{\text{п}}}{P_{\text{с}}} = \frac{G_{\text{п}}\Delta f_{\text{п}}}{G_{\text{с}}\Delta f_{\text{с}}}, \qquad (1)$$

где $G_{\text{п}}$ и $G_{\text{с}}$ – спектральные плотности соответственно сигнала и помехи;
Δf_{n} и Δf_{c} – полосы спектра, занятые помехой и сигналом.

При этом можно положить, что энергетические спектры $G_{\text{п}}$ и $G_{\text{с}}$ постоянны в пределах полос $\Delta f_{\text{п}}$ и $\Delta f_{\text{с}}$.

На приеме, при обработке аддитивной смеси широкополосного сигнала с помехой в соответствии с преобразованием, иллюстрируемым схемой (*рисунок 2*), спектр сигнала сворачивается в полосу сообщения ΔF.

Помеха формируется без использования последовательности, когерентной с $g(t)$. Поэтому на приеме спектр помехи, перемноженной с опорной последовательностью $g(t)$, оказывается результатом свертки спектров помехи на входе приемника $\Pi(t)$ и спектра сигнала, расширенного последовательностью $g(t)$. В результате такого преобразовании спектр даже узкополосной помехи расширяется до величины прядка $\Delta f_{\text{с}}$. Точнее, эффективная ширина такого спектра составит $\Delta f_{э}=\Delta f_{c}+\Delta f_{П}$. А мощность помехи, оказывающей деструктивное воздействие на результат обработки сигнала, составит

$$P'_{\text{п}} = G'_{\text{п}}\Delta F = \frac{P_{\text{п}}\Delta F}{\Delta f_{\text{с}} + \Delta f_{\text{п}}} = \frac{P_{\text{п}}\Delta F}{\Delta f_{\text{с}}\left(1+\frac{\Delta f_{\text{п}}}{\Delta f_{\text{с}}}\right)} = \frac{P_{\text{п}}}{1+\frac{\Delta f_{\text{п}}}{\Delta f_{\text{с}}}}\frac{1}{B}. \qquad (2)$$

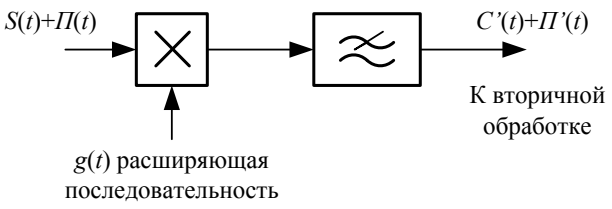


Рис. 2. Сворачивание спектра при приеме широкополосного сигнала в узкую информационную полосу ΔF

Таким образом, коэффициент подавления сигнала помехой в информационной полосе ΔF составит $k_{\text{п}} = \frac{P'_{\text{п}}}{P'_{\text{с}}} = \frac{P_{\text{п}}}{P_{\text{с}}}\frac{1}{B}\frac{1}{1+\frac{\Delta f_{\text{п}}}{\Delta f_{\text{с}}}} = \frac{1}{qB}\frac{1}{1+\frac{\Delta f_{\text{п}}}{\Delta f_{\text{с}}}}$, (3)

где $q = \frac{P_{\text{с}}}{P_{\text{п}}}$ – соотношение сигнал/помеха на входе по мощности.

Из (3) следует, что подавление для заданного соотношения сигнал/помеха будет максимальным при минимуме ширины спектра помехи $\Delta f_{П}$. Этот парадоксальный эффект объясняется тем, что спектр узкополосной помехи, перемноженной с опорной расширяющей последовательностью $g(t)$, локализуется в полосе $\Delta f_{c}+\Delta f_{П}$, а в полосе вторичной обработки ΔF сосредотачивается помеховая мощность

$$P''_{\text{п}} = \frac{P_{\text{п}}\Delta F}{1+\frac{\Delta f_{\text{п}}}{\Delta f_{\text{с}}}}. \qquad (4)$$

Поэтому, создавая эффективную помеху для противодействия системам с широкополосным радиосигналом, можно не стремиться согласовывать ширину спектра шумовой помехи со спектром подавляемого сигнала. На демодуляторе сигнала с помехой в широкополосном приемнике даже узкополосная помеха расширяет спектр до ширины спектра последовательности $g(t)$. Т. е. превращается в прицельную по ширине спектра.

Но для борьбы с узкополосной помехой в системах с ШПС разработаны и с успехом применяются методы, основанные на использовании режектирования. Такой метод борьбы с узкополосными помехами применяется разными системами, как передачи, так и извлечения информации. Режекторными фильтрами на входе снабжаются все профессиональные навигационные приемники. Не менее актуален этот прием обеспечения помехозащищенности и для систем связи [3].

Если определить участок локализации спектра помехи на оси частот и осуществить режекцию в полосе $\Delta f_{\text{п}}$, будет потеряна, кроме мощности помехи, и некоторая часть мощности сигнала $\Delta P_{\text{с}}$. И эти потери тем меньше, а эффективность помехозащиты тем лучше, чем уже спектр помехи:

$$\Delta P_{\text{с}} = G_{\text{с}}\Delta f_{\text{п}} = \frac{P_{\text{с}}\Delta f_{\text{п}}}{\Delta f_{\text{с}}}. \qquad (5)$$

Из (5) следует, что для парирования эффекта режектирования помехи нужно максимально расширять ее спектр, вплоть до ширины спектра сигнала. Поэтому уместна постановка оптимизационной задачи выбора соотношения полос широкополосного сигнала и помехи, используемой для его подавления. В дальнейшем в качестве

критерия эффективности при решении указанной оптимизационной задачи принят коэффициент подавления сигнала помехой.

При режекции подавляется тот участок спектра помехи (и сигнала), в котором обнаруживается помеховое воздействие. Ширина полосы участка анализа и обнаружения помехи $\Delta f_{\text{ан.}}$

Вероятность обнаружения помехи в полосе $\Delta f_{\text{ан}}$ составляет $P_{\text{обн}}=1-p_{\text{проп}}$, где $p_{\text{проп}}$ – вероятность пропуска помехи обнаружителем. Если происходит обнаружение помехи и, соответственно, режекция этой помехи, ширина спектра уменьшается на величину $\Delta f_{\text{ан}}$, а полная мощность помехи – на величину $\delta P_{\text{п}}$ с вероятностью $p_{\text{обн}}$. В полосе спектра помехи $\Delta f_{\text{п}}$ таких анализируемых участков шириной $\Delta f_{\text{ан}}$ будет $\frac{\Delta f_{\text{п}}}{\Delta f_{\text{ан}}}$. Поэтому вследствие режекции помеха потеряет мощность

$$\delta P_{\text{п}} = G_{\text{п}}\Delta f_{\text{ан}}\frac{\Delta f_{\text{п}}}{\Delta f_{\text{ан}}}P_{\text{обн}} = P_{\text{п}}p_{\text{обн}}, \qquad (6)$$

и в результате мощность помехи, подвергшейся режекции, составит

$$P''_{\text{п}} = P_{\text{п}} - P_{\text{п}}p_{\text{обн}} = P_{\text{п}}p_{\text{пр}}, \qquad (7)$$

где $p_{\text{проп}}=1-p_{\text{обн}}$ – вероятность необнаружения (пропуска) помехового воздействия при реализации процедуры обеспечения помехозащиты на основе использования эффекта режектирования помехи.

Режекция помехи уменьшает и мощность сигнала в полосе вторичной обработки. При этом теряется не только мощность сигнала, перекрытого помехой, но и мощность сигнала на тех участках спектра сигнала, где происходит ложное обнаружение помехи. А именно

$$\begin{aligned} P''_{\text{с}} &= P_{\text{с}} - P_{\text{с}}\left[\frac{\Delta f_{\text{п}}}{\Delta f_{\text{с}}}p_{\text{обн}} - \frac{\Delta f_{\text{с}}-\Delta f_{\text{п}}}{\Delta f_{\text{с}}}p_{\text{лт}}\right] = \\ &= P_{\text{с}}\left[1-\frac{\Delta f_{\text{п}}}{\Delta f_{\text{с}}}\left(1-p_{\text{пр}}\right)-\left(1-\frac{\Delta f_{\text{п}}}{\Delta f_{\text{с}}}\right)p_{\text{лт}}\right], \end{aligned} \qquad (8)$$

где $P_{\text{лт}}$ – вероятность ложного обнаружения присутствия помехи.

Таким образом, коэффициент подавления сигнала помехой в результате режекции обнаруживаемой шумовой помехи составит

$$k_{\text{п}} = \frac{P''_{\text{п}}}{P''_{\text{с}}} = \frac{P_{\text{п}}}{P_{\text{с}}}\frac{p_{\text{пр}}}{\left(1-p_{\text{лт}}\right)-\frac{\Delta f_{\text{п}}}{\Delta f_{\text{с}}}\left[1-\left(p_{\text{пр}}+p_{\text{лт}}\right)\right]}. \qquad (9)$$

Соотношение мощностей помеха/сигнал $P_{\text{п}}/P_{\text{с}}$ на входе схемы режекции помехи. Поэтому коэффициент

$$\beta = \frac{p_{\text{пр}}}{\left(1-p_{\text{лт}}\right)-\frac{\Delta f_{\text{п}}}{\Delta f_{\text{с}}}\left[1-\left(p_{\text{пр}}+p_{\text{лт}}\right)\right]} \qquad (10)$$

представляет выигрыш в помехозащищенности системы, использующей режектирование шумовой помехи и, соответственно, проигрыш системы противодействия за счет использования шумовой помехи, не прицельной по ширине полосы подавляемого сигнала, когда $\frac{\Delta f_{\text{п}}}{\Delta f_{\text{с}}}<1$. Компенсировать проигрыш за счет использования помехи с шириной спектра $\Delta f_{П}<\Delta f_{c}$ можно за счет соответствующего увеличения мощности этой помехи в β раз.

Как пропуск помехи, так и ложная тревога при ее обнаружении, приводят к одинаковым последствиям – к потери мощности сигнала. Поэтому естественно считать, что риск совершения этих ошибок обнаружения помехи одинаков и положить $P_{\text{проп}}=P_{\text{лт}}=P$. Поэтому можно положить

$$\beta \simeq \frac{p}{(1-p)-\frac{\Delta f_{\text{п}}}{\Delta f_{\text{с}}}(1-2p)}. \qquad (11)$$

Из (11) следует, что при хорошей работе системы режекции помехового воздействия, когда вероятности ошибок $p\to 0$, проигрыш системы противодействия не компенсируется ни каким увеличением мощности помехи ($\beta\to 0$). В противоположном случае, при больших вероятностях ошибок, когда $p\to 1$,

$$\beta \simeq \left(\frac{\Delta f_{\text{п}}}{\Delta f_{\text{с}}}\right)^{-1},$$

как на *рисунке 3*.

Это означает, что при шумовой помехе, согласованной по полосе с полосой спектра сигнала, когда $\Delta f_{П}<\Delta f_{c}$, режекция вообще неэффективна для помехозащиты. А при том, что шумовая помеха перекрывает половину ширины спектра сигнала, это рассогласование компенсируется двукратным увеличением мощности (и, соответственно, коэффициента подавления).

Ограничения и допущения, при которых получен результат.

1. При анализе не учитывалось влияние на подавление сигнала аддитивного шума приемных устройств. Это оправдано несоизмеримостью мощности собственного аддитивного шума приемника широкополосного сигнала с мощностью специально организованной помехи.

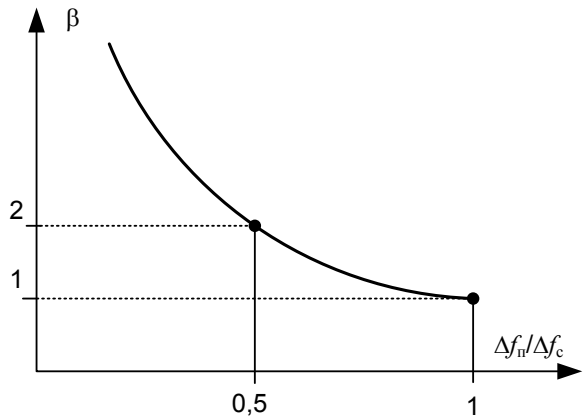


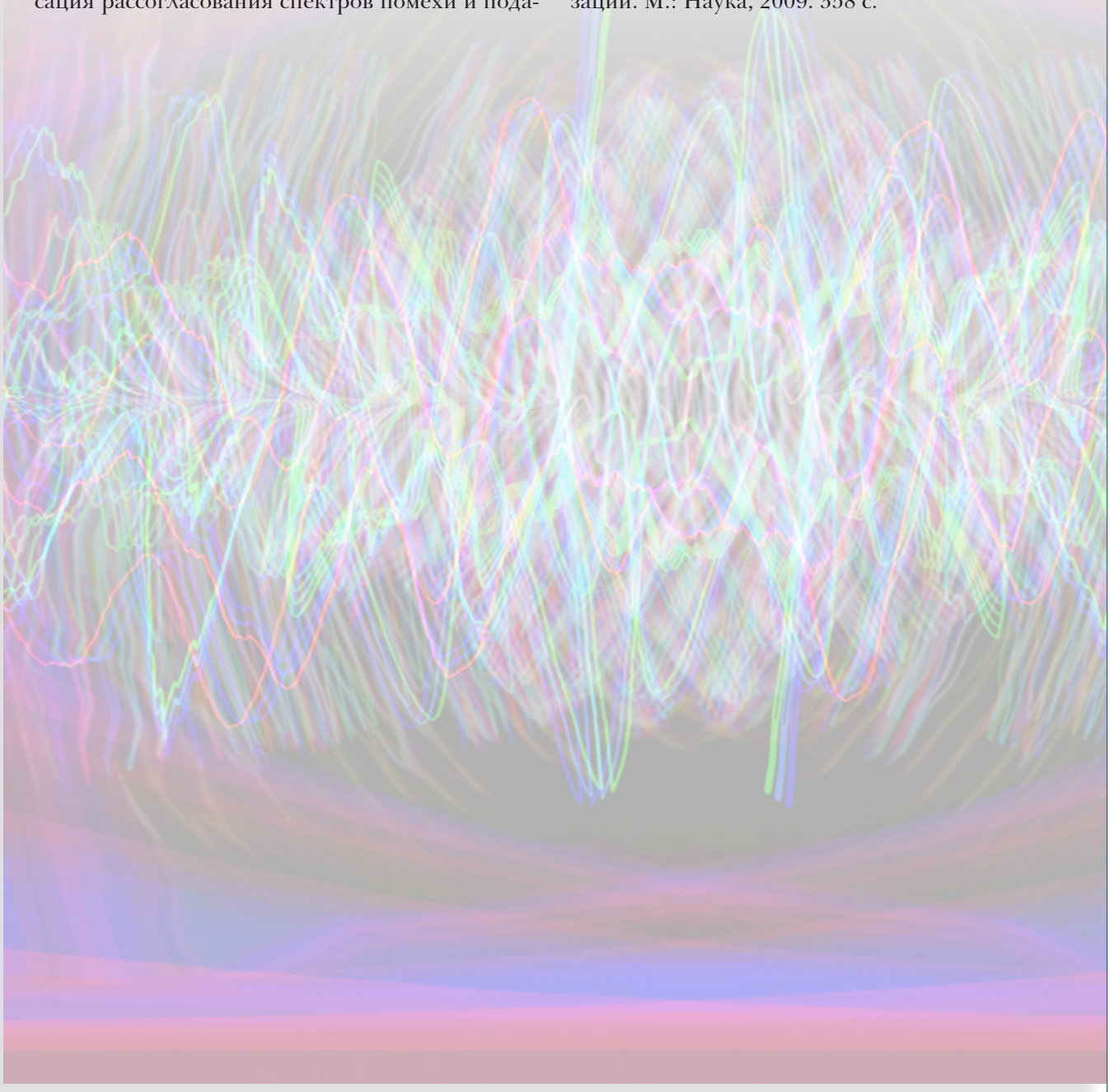
Рис. 3. Диаграмма обмена мощности шумовой помехи на относительную ширину ее спектра при подавлении систем с широкополосными сигналами

2. Считается, что входные цепи приемника сигнала работают в линейном режиме. При этом не происходит подавления сигнала помехой на входе и возможен спектральный анализ входного процесса для определения факта радиопротиводействия и обнаружения участка спектра, пораженного помехой. В случае такого подавления, когда мощность помехи весьма значительна по сравнению с мощностью сигнала, эффективность помехи будет не хуже, чем в рассмотренном случае.

3. Вероятности ошибок системы помехозащиты, использующей режектирование помехи, также растут вместе с соотношением шум/сигнал на входе. Поэтому следует ожидать, что компенсация рассогласования спектров помехи и подавляемого сигнала потребует меньших значений коэффициента подавления. То есть полученные зависимости коэффициента подавления от относительной ширины спектра помехи являются верхними, осторожными оценками.

Литература

1. Помехозащищенность систем со сложными сигналами / Под ред. Г.И. Тузова. М.: Радио и связь, 1985. 264 с.
2. Куприянов А.И., Шустов Л.Н. Радиоэлектронная борьба. Основы теории. М.: Вузовская книга, 2011. 800 с.
3. Борисов В.И. Помехозащищенность систем радиосвязи: основы теории и принципы реализации. М.: Наука, 2009. 358 с.



УДК 004.056.53

ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОУРОВНЕВОГО КОМБИНИРОВАННОГО АНАЛИЗА СЕТЕВЫХ ПАКЕТОВ В СИСТЕМАХ ОБНАРУЖЕНИЯ ВТОРЖЕНИЙ

APPLYING OF COMBINED MULTILEVEL ANALYSIS OF NETWORK PACKAGES IN INTRUSION DETECTION SYSTEMS

Павел Валерьевич Фролов
аспирант
кафедра «Защита информации»
Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана
Адрес: 248000, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2
Тел.: 8 (910) 598-45-81
E-mail: HAN-92@mail.ru

Анатолий Викторович Мазин
доктор технических наук, профессор
заведующий кафедрой «Защита информации»
Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана
Адрес: 248000, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2
Тел.: 8 (910) 915-58-25
E-mail: mazinav@yandex.ru

Светлана Александровна Медведева
студент магистратуры
кафедра «Системы обработки информации»
Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана
Адрес: 248000, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2
Тел.: 8 (920) 898-01-77
E-mail: svetlana_medvedeva_1997@mail.ru

Евгений Владимирович Вершинин
кандидат физико-математических наук, доцент
заведующий кафедрой
«Системы обработки информации»
Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана
Адрес: 248000, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2
Тел.: 8 (910) 510-73-50
E-mail: yevgeniyv@mail.ru

Аннотация

В связи с тем, что в настоящее время в различных системах обнаружения вторжений применяемые в них подходы анализа сетевых атак не обеспечивают достаточную гарантию защиты информационных систем, необходимо искать новые подходы для решения данной проблемы. В данной работе рассматривается подход многоуровневого комбинированного анализа пакетов в системах обнаружения вторжений. Исследуется принцип различных подходов анализа сетевых пакетов. Описываются проблемы, которые возникают в ходе анализа сетевого трафика. Для решения проблем в работе предлагается применить подход обработки сетевого трафика, который основан на комбинации на разных уровнях модели ISO/OSI различных методов анализа. Данный подход позволит обеспечить ряд преимуществ при его правильном использовании в системах обнаружения вторжений.

Ключевые слова: сетевая атака, сетевой пакет, модель OSI, системы обнаружения вторжений, анализ сетевого трафика.

Summary

Due to the fact that, currently network attack analysis approaches used in various Intrusion Detection Systems do not provide a sufficient guarantee for the protection of information systems, it is necessary to look for new approaches to solve this problem. This paper discusses the approach of combined multilevel packet analysis in intrusion detection systems. The principle of various approaches to the analysis of network packets is investigated. The problems that arise during the analysis of network traffic are described. To solve problems, it is proposed to apply the network traffic processing approach, which is based on a combination of different analysis methods at different levels of the OSI model in this work. This approach will provide a number of advantages when used correctly in Intrusion Detection Systems.

Keywords: network attack, network packet, OSI model, intrusion detection systems, network traffic analysis.

Введение

В настоящее время существует большое число как зарубежных, так и отечественных систем обнаружения вторжений (СОВ, Intrusion Detection System – IDS). Они все применяют при обнаружении сетевых атак различные подходы и методы [1], но ни один из них не может гарантировать стопроцентной защищенности информационной системы (ИС) от кибератак. Поэтому на сегодняшний день достаточно актуальной

проблемой является поиск наиболее эффективных методов выявления вторжений в ИС. Главное требование к таким методам – возможность обнаружения произвольных типов атак, включая возникающие их новые виды в режиме реального времени.

Концептуально новым направлением применения алгоритмов анализа сетевого трафика является одновременное использование различных методов (или комбинаций методов) обнаружения атак. Кроме того, анализируемый сетевой трафик можно разделять по уровням эталонной модели ISO/OSI и применять к различным уровням разные методы анализа или их комбинации, что позволит достичь повышения эффективности обнаружения вторжений.

Цель исследования

Целью данной работы является применение метода обработки и фильтрации большого объема сетевого трафика, основанного на комбинации различных интеллектуальных методов анализа на разных уровнях эталонной модели ISO\OSI с целью повышения эффективности работы IDS.

Основная часть

Для повышения вероятности компрометации ИС злоумышленники постоянно совершенствуют свои наборы инструментов, разрабатывают новые технологии проникновения в ЛВС, модифицируют свое вредоносное программное обеспечение (ВПО) и придумывают новые методы обхода IDS. Для борьбы с новыми типами угроз, необходимо применять интеллектуальные методы анализа сетевых данных [2]. Однако все методы обнаружения вторжений являются разнородными и детектируют кибератаки с разной эффективностью: одни методы лучше детектируют один тип атак, а вторые – другой и т.д. Поэтому комбинация различных методов обнаружения сетевых атак на различных уровнях может значительно повысить эффективность работы IDS.

Для анализа сетевого трафика на разных уровнях существует 3 основных подхода: поверхностный анализ, средний анализ и глубокий анализ пакетов (*рисунок 1*) [3].

Первый подход – поверхностный анализ пакетов (Shallow Packet Inspection – SPI). В основном к анализаторам поверхностного уровня относят простые межсетевые экраны, различные маршрутизаторы и другие устройства сети. Этот подход помогает ограничить внешний доступ к сервисам и компьютерам, находящимся во внутренней сети. Поверхностный уровень анализирует пакет до сетевого уровня.

Второй подход – средний анализ пакетов (Medium Packet Inspection – MPI). Все инструменты, которые принадлежат среднему уровню, фильтруют трафик при помощи информации о форматах данных передачи и более полной локализации отправителя этих данных. Обычно данные инструменты являются посредниками между внутренней сетью и провайдером доступа к Интернету. Средний анализ предполагает анализ до сеансового уровня.

И третий подход – глубокий анализ пакетов

Рис. 1. Уровни анализа пакетов

Таблица 1

Сопоставление типов атак и уровней их обнаружения

Тип атаки	Номер уровня модели OSI
Сниффер пакетов	2
IP-спуфинг	3
Отказ в обслуживании	1-7 (чаще всего 4 и 7)
Парольные атаки	7
Атаки типа Man-in-the-Middle	2
Атаки на уровне приложений	7
Сетевая разведка	1-7
Переадресация портов	3
Вирусы и приложения типа «троянский конь»	7

(Deep Packet Inspection - DPI). Углубленный анализ предполагает анализ данных по всем уровням пакета полностью [4].

На разных уровнях эталонной модели ISO/OSI можно обнаружить различные виды сетевых атак. Сетевые атаки столь же многообразны, как и системы, против которых они направлены. Некоторые атаки отличаются большой сложностью, другие по силам обычному оператору, даже не предполагающему, к каким последствиям может привести их деятельность [5].

На основе изученных сведений о классификации сетевых атак [6] составлена таблица, где указаны примеры того, на каком уровне модели ISO/OSI можно встретить некоторые распространенные типы атак (см. *таблицу 1*).

Для получения более объективных результатов следует применять многоуровневый анализ (*рисунок 2*). Анализатор сетевого трафика, получив пакет данных, формирует три объекта исследования: в 1 части содержится информация 1-3 уровней, во 2 части – 1-5 уровней, в 3 части – 1-7 уровней. К каждому сформированному фрагменту применяется выбранный метод или комбинация методов для проведения поверхностного, среднего и глубокого анализа.

На основе данных исследования наиболее эффективных интеллектуальных подходов обнаружения [7] вторжений были выбраны наиболее эффективные методы.

Хотя выбранные методы являются наиболее эффективными при обнаружении сетевых атак, однако каждый метод имеет свою погрешность и выявляет определенные атаки лучше других. Поэтому наиболее объективный результат может дать сведение результатов каждого метода в единый результирующий вектор и применять такой комбинированный подход на каждом из уровней анализа: и для DPI, и для MPI, и для SPI. При этом результаты можно получать как для каждого уровня по-отдельности, так и сводить их воедино, что позволит получать наиболее объективные данные об атаках.

При раздельном многоуровневом анализе производится суммирование полученных результатов отдельно для MPI, SPI и DPI (*рисунок 3*). Если при сложении промежуточных результатов $(R_1,R_2,..,R_N)$ вектора $R_{SPP}R_{MPP}R_{DPI}$ в итоге содержат только нули, то вторжений не обнаружено. Если у векторов содержатся единицы, то возникло ложное срабатывание. Если значения векторов больше единицы, то обнаружена атака.

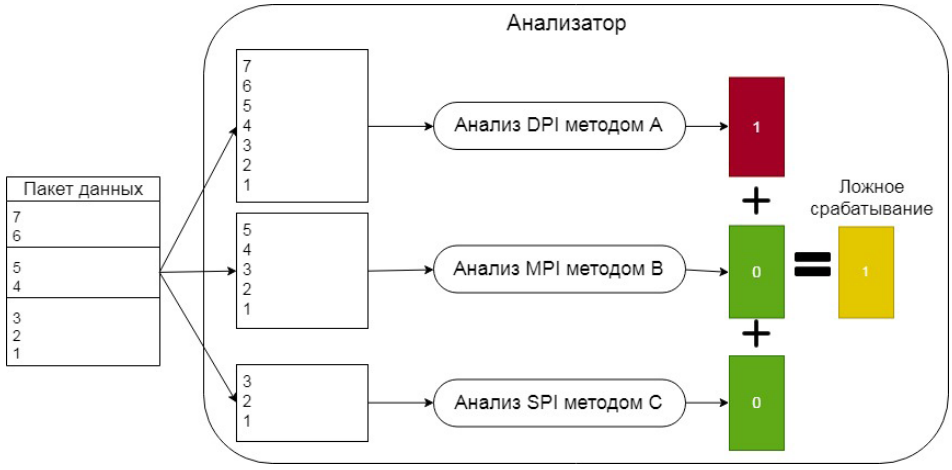


Рис. 2. Процесс анализа пакета данных

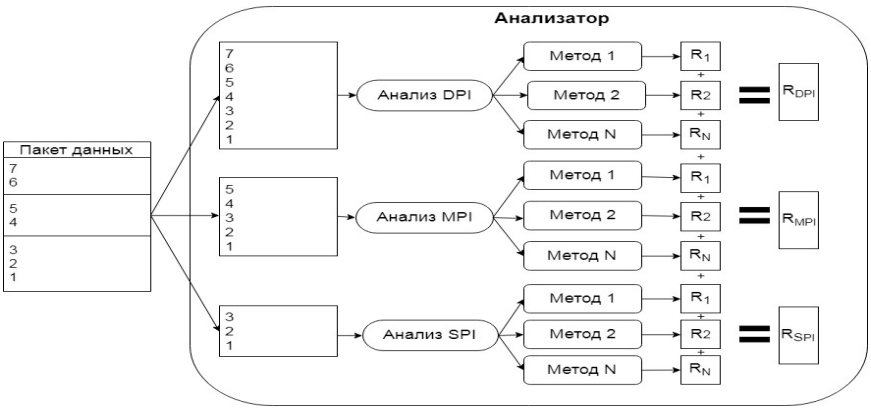


Рис. 3. Раздельный анализ результатов

Затем на основе этих полученных результатов (R_{SPI},R_{MPI},R_{DPI}) для администратора сети выводится информация о выявленных вторжениях от глубокого анализа до поверхностного.

При совместном многоуровневом анализе полученные результаты (R_1,R_2,..,R_N) умножаются на коэффициенты (результаты подхода SPI на 1, MPI на 2, DPI на 3, т.к. глубокий анализ более значим, чем средний и тем более поверхностный анализ пакетов). Затем все полученные результаты складываются, и получается результирующий вектор (*рисунок 4*), который предоставляет более достоверную оценку трафика, чем применение одного метода ко всему пакету. Если в результирующем векторе R содержатся нули, то атак не обнаружено, если единицы – произошло ложное срабатывание, если значения больше единицы – обнаружена атака. В случае обнаружения вторжений анализатор передает полученный результат администратору сети, который принимает дальнейшие меры по остановке или предотвращению кибератаки [3].

Преимуществами применения многоуровневого анализа сетевого трафика являются возможность обнаружения новых атак, повышение эффективности IDS, снижение вероятности ложных срабатываний, применение сильных сторон различных методов обнаружения вторжений.

Заключение

В результате данного исследования было рассмотрено применение метода обработки и фильтрации большого объема сетевого трафика, основанного на комбинации различных интеллектуальных методов анализа на разных уровнях эталонной модели ISO\OSI с целью повышения эффективности работы IDS.

На данном этапе производится моделирование работы многоуровневого комбинированного анализатора, что позволит численно оценить повышение эффективности предложенного метода.

Литература

1. Малюк А.А. Информационная безопасность: концептуальные и методологические основы защиты информации. Учеб. пособие для вузов. М.: Горячая линия-Телеком, 2004. 280 с.
2. Вредоносные программы и защита от них [Электронный ресурс]. Адрес доступа: https://studref.com/325277/informatika/vredonosnye_programmy_zaschita
3. Гетьман А.И., Евстропов Е.Ф., Маркин Ю.В. Анализ сетевого трафика в режиме реального времени: обзор прикладных задач, подходов и решений [Электронный ресурс]. Адрес доступа: https://www.ispras.ru/preprints/docs/prep_28_2015.pdf
4. Медведева С.А., Вершинин Е.В., Фролов П.В. Анализ сетевого трафика с использованием комбинации методов на разных уровнях модели ISO/OSI и технологии BLOCKCHAIN для хранения признаков сетевых атак [Электронный ресурс]. Адрес доступа: http://conference.bmstu-kaluga.ru/uploads/userfiles/konferenciya_t3_sekciya_08_12_.pdf
5. Классификация сетевых атак [Электронный ресурс]. Адрес доступа: https://www.internet-technologies.ru/articles/klassifikaciya-setevyh-atak.html
6. Лукацкий А.В. Обнаружение атак. СПб.: БХВ-Петербург, 2001. 624 с.
7. Фролов П.В., Вершинин Е.В., Медведева С.А. Исследование методов обнаружения сетевых атак // Вопросы радиоэлектроники, 2019. №11. С.55-59.

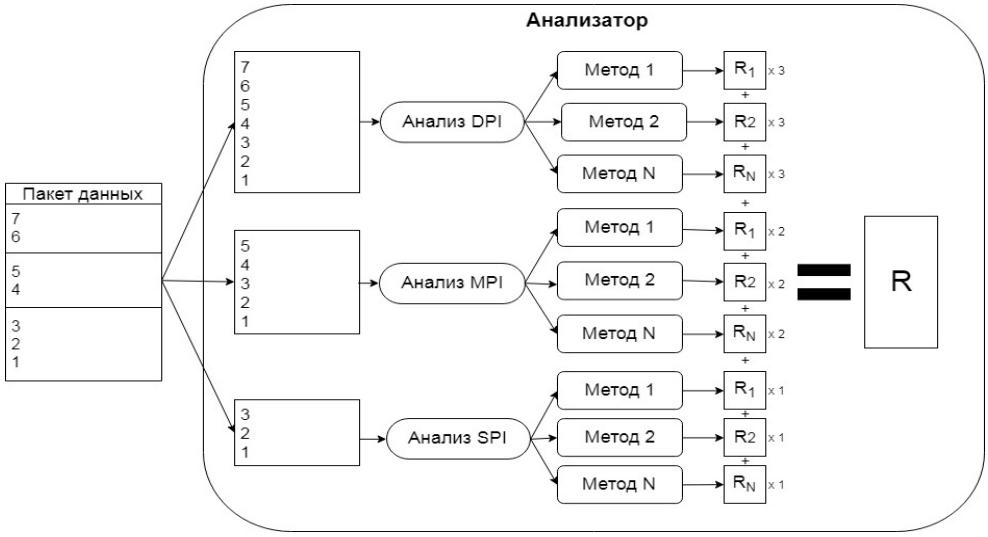
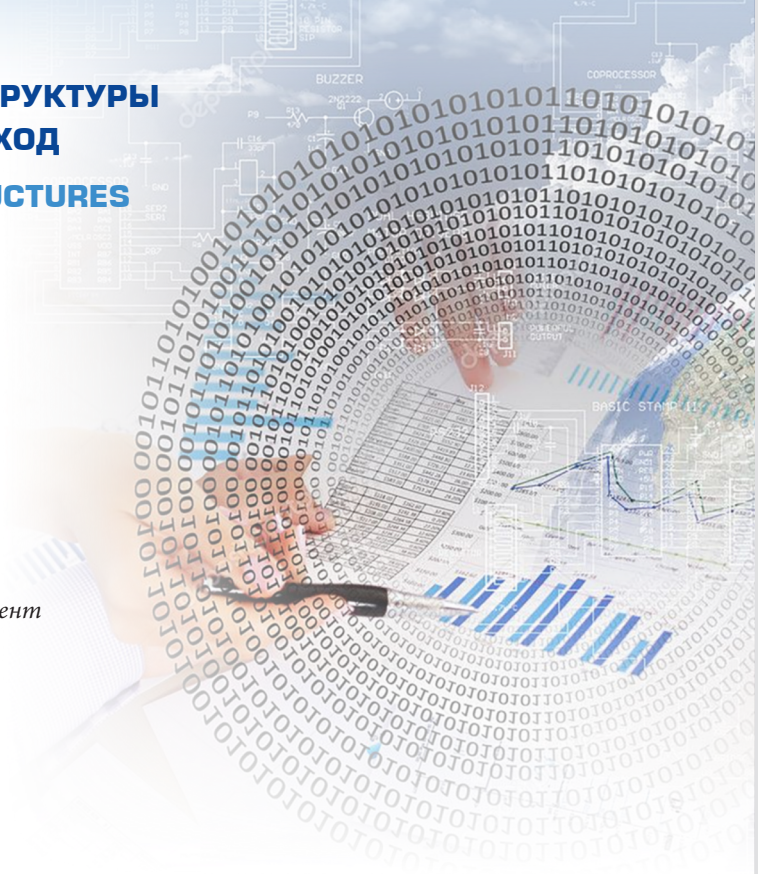


Рис. 4. Второй вариант интерпретации результатов

УДК 004.056

ЗАЩИЩЕННОСТЬ ОБЪЕКТА: СТРУКТУРЫ СОБЫТИЙ И СЦЕНАРНЫЙ ПОДХОД

OBJECT SECURITY: EVENT STRUCTURES AND SCENARIO APPROACH



Елена Павловна Бутрина
начальник отдела разработки
специального программного обеспечения и
сопровождения проектов
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов,
Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7 (916) 245-98-82
E-mail: kenga48@yandex.ru

Владимир Петрович Олейников
кандидат физико-математических наук, доцент
старший эксперт
отдел разработки
специального программного обеспечения и
сопровождения проектов
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов,
Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: 8 (916) 576-18-39
E-mail: vpoleinicov@mail.ru

Аннотация
Построение формальной модели защищенности объекта требует анализа событий, с ним происходящих. Данная работа посвящена исследованию структур этих сложных событий, которые естественно организуются в сценарии. Рассмотрены структуры сценариев и методы их построения (сценарный подход).
Ключевые слова: защищенность объекта, структура событий, сценарный подход, декомпозиция.

Summary
The construction of a formal model of the security of an object requires an analysis of the events that occur with it. This work is devoted to the study of the structures of these complex events, which are naturally organized in the scenario. The structure of scenarios and methods of their construction (scenario approach) are considered.
Keywords: object security, structure of events, scenario approach, decomposition.

Структуры событий

Функции для описания системы событий

Защищаемый объект (ЗО) находится в некотором окружении – среде, в которую при решении поставленной задачи включаются только те предметы, которые влияют на главное свойство ЗО – его защищенность. Именно их мы моделируем как объекты, включенные в объектную модель задачи. На множестве свойств объектов модели задачи происходит множество событий $X_i=(I_i; P_i)$, i = 1…N, N – число событий. Событие «нарушена защищенность защищаемого объекта» (НЗЗО) ≡ X_0 есть некоторая функция от этих событий и представляется как результат *базовых операций* над событиями $\{X_i\}$.

Любое событие X можно выразить как логическую функцию составляющих его событий X_i:

$$X = F_X(X_1, X_2, \ldots, X_N) \quad (1)$$

Аналогично, индикатор $I(X)$ события X есть булева функция (функция алгебры логики, ФАЛ) индикаторов $I(X_i)$:

$$I_X = I_X(I_1, I_2, \ldots, I_N) \quad (2)$$

Функция, выражающая состояние системы через состояния ее элементов, называется [4] *структурной функцией системы* (СФС). Синоним в теории надежности – *функция работоспособности системы* (ФРС), которая формализует понятие истинности для работоспособности системы.

Строго говоря, структуру системы событий описывают две функции:

- *структурная* (логическая) функция системы (СФС) F_X (1), выражающая сложное событие X

как результат *логических* операций над его составляющими X_i;

● *индикаторная* функция системы (ИФС) I_X (2), которая выражает индикатор сложного события X как результат *арифметических* действий с числами I_i.

На основе этих функций надо найти *вероятностную функцию системы* (ВФС) – зависимость вероятности сложного события P_X от вероятностей $r_i \equiv P(X_i)$ его составляющих:

$$P_X = P_X(r_1, r_2, \ldots, r_N) \qquad (3)$$

Так построение формальной модели естественно разбивается на три этапа:

$$\text{СФС} \rightarrow \text{ИФС} \rightarrow \text{ВФС} \qquad (4)$$

Параллельные структуры из двух событий

Графический образ параллельных структур одинаков как для совместных, так и несовместных событий. Но СФС и ИФС в этих случаях имеют принципиально различный характер (*таблица 1*).

Многособытийные структуры параллельного типа

Анализ строки «Условия реализации» таблицы (1) и аналогичной таблицы из предыдущей работы показывает, что их легко обобщить на любое число событий X_i (*таблица 2*).

Анализ условий реализации / не реализации события X позволяет обобщить их на другие сложные события с параллельной структурой:

$$I(X) = IIf\left(\Sigma;1;0\right) \qquad (13)$$

где условие $\sum$ имеет вид

$$\Sigma = \left(\sum_{k=1}^{k=N} I_k\right) \odot K \qquad (14)$$

(символ $\odot$ обозначает любую из операций сравнения: $=, \neq, <, \leq, >, \geq$). Эти структуры назовем квазипараллельными. Например, при $\odot$ $=$ реализация события X определяется условием «Из N событий реализуется ровно K» ($K|N$). Эти структуры описывают вполне реальные ситуации.

Пример. Прорыв через КПП возможен, если из 5 нападающих выведено из строя менее 3-х.

Таблица 1

Совместные и несовместные события в параллельной структуре

X	сумма	симметрическая разность
X_1 и X_2	совместны	не совместны
Описание	либо X_1, либо X_2, либо оба вместе	либо X_1, либо X_2
Условие	хотя бы одно [X из всех]	только одно [X из всех]
Операция	сумма (дизъюнкция)	сумма по модулю 2 (строгая дизъюнкция)
Синоним	[нестрогое] ИЛИ	строгое ИЛИ
ФАЛ	X_1+X_2	$X_1 \oplus X_2 = (X_1 \cdot X'_2)+(X'_1 \cdot X_2)$
Индикатор	$I_1+I_2-I_1 \cdot I_2$ (5)	$I_1+I_2-2 \cdot I_1 \cdot I_2$ (6)
Вероятность	$r_1+r_2-r_1 \cdot r_2$ (7)	$r_1+r_2-2 \cdot r_1 \cdot r_2 = r_1 \cdot q_2 + r_2 \cdot q_1$ (8)

Таблица 2

Некоторые структуры из многих событий

Структура	последовательная	параллельная	
События X_i	независимые	совместные	несовместные в совокупности
Условие реализации	Все X_i	Хотя бы один из X_i	Только один из X_i
Условие НЕреализации	Хотя бы один $X`_i$	Все $X`_i$	Ни одного X_i ИЛИ более одного X_i
Операция	произведение	сумма	сумма по модулю 2
Логика	И (конъюнкция)	ИЛИ (дизъюнкция)	Строгое ИЛИ (строгая дизъюнкция)
СФС F_X	$\bigwedge_{\{i\}} X_i$ (9)	$\bigvee_{\{i\}} X_i$ (10)	$(X_1 \cdot X'_2 \cdot \ldots \cdot X'_N)+$ $+(X'_1 \cdot X_2 \cdot \ldots \cdot X'_N)+$ $+\ldots+$ $+(X'_1 \cdot X'_2 \cdot \ldots \cdot X_N)$
ИФС I_X	$\prod_{\{i\}} I_i = \min(1, \{I_i\})$ (11)	$1-\prod_{\{i\}}(1-I_i) =$ $= \max(0, \{I_i\})$	$IIf\left(\left(\sum_{i=1}^{i=N} I_i\right)=1;1;0\right)$
ВФС P_X	$P_X = \prod_{\{i\}} r_i$ (12)	$1-\prod_{\{i\}}(1-r_i)$	$\sum_{i=1}^{i=N}\left(r_k \cdot \prod_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{j=N} q_j\right)$

Пример. Система считается надежной, если не менее (любых) K из N проверяемых параметров удовлетворяют нормативам.

Построение ИФС таких систем событий не представляет сложности, в то время как построение СФС – задача не из простых. Вычисление же ВФС скорее громоздко, чем сложно.

Сценарный подход
Сценарии

Независимость событий, выражаемая формулой (12), есть гипотеза, причем неявно подразумевается, что все события происходят в рамках одного статистического испытания (в некотором смысле – одномоментно). При этом предполагается, что пространство элементарных исходов (ПЭИ) не меняется.

Пример. Событие X = (Замужняя Мэри родила) есть логическое произведение двух событий X_1 = (Мэри вышла замуж) и X_2 = (Мэри родила): $X = X_1 \cdot X_2$. Хотя формально $X = X_2 \cdot X_1 = X_1 \cdot X_2$, в реальности эта последовательность событий кардинально отличается от последовательности X_2 = (Мэри родила) и затем X_1 = (Мэри вышла замуж).

В теории вероятностей вместо формулы (12) для рассмотрения таких ситуаций используется *теорема об умножении вероятностей*:

$$P(X_1 \cdot X_2) = P(X_1) \cdot P(X_2 | X_1) = P(X_2) \cdot P(X_1 | X_2) \quad (15)$$

Здесь $P(A|B)$ – условная вероятность события A при условии, что уже реализовалось событие B. То есть, после реализации B мы имеем дело с другим пространством элементарных исходов (ПЭИ).

Второе равенство в (15) справедливо в ситуации, когда ПЭИ не меняется на интервале времени, пока происходят события X_1 и X_2. Но реализация события X_1 может изменить ПЭИ не так, как реализация события X_2, вследствие чего

$$P(X_1 <_t X_2) = P(X_1) \cdot P(X_2 | X_1) \neq P(X_2 <_t X_1) = \\ = P(X_2) \cdot P(X_1 | X_2), \quad (16)$$

где запись '$A <_t B$' обозначает, что событие A предшествует по времени событию B.

Пример. Условный расчет для Мэри (*таблица 3*). То есть, различные последовательности событий имеют разную вероятность реализации, что интуитивно абсолютно понятно.

Таблица 3

Пример вычисления вероятностей

Событие = Мэри …	Обозн.	Вер-ть
вышла замуж	X1	0,8
родила	X2 | X1	0,95
вышла замуж и родила	$X1 <_t X2$	0,76
родила	X2	0,9
вышла замуж	X1 | X2	0,1
родила и вышла замуж	$X2 <_t X1$	0,09

Это означает, что цепочка зависимых событий должна рассматриваться как *сценарий* – сложное событие с последовательной структурой, которое описывается *кортежем* (X_i), а не множеством $\{X_i\}$. ВФС в этом случае имеет вид:

$$P(X_1 <_t X_2 <_t \ldots <_t X_N) = = P(X_1) \cdot P(X_2 | X_1) \cdot P(X_3 | X_1 \cdot X_2) \cdot \ldots \\ \cdot P(X_N | X_1 \cdot X_2 \cdot \ldots \cdot X_{N-1}) \quad (17)$$

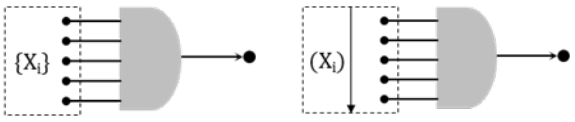
Графическое изображение многособытийных структур

Сценарий представляется графом в виде последовательной цепочки ребер, каждое из которых изображает одно событие (*рисунок 1*), а узлы – различные состояния.

Рис. 1. Событие с последовательной структурой

Формально-логически порядок событий, в силу коммутативности операции логического умножения (конъюнкции), не имеет значения для формулы (9), тем более для (11) и (12). Поэтому в методиках, использующих формулы событий такого типа (например, анализ дерева отказов – FTA, fault tree analysis), для графического отображения этой ситуации используется элемент, не предполагающий указания последовательности событий во времени (*рисунок 2а*).

Это свойство позволяет формально рассматривать ситуации, совершенно непохожие с точки зрения «реальности», как логически (и вычислительно!) эквивалентные. Но это справедливо лишь для независимых событий, составляющих множество $\{X_i\}$. В случае сценария как кортежа (X_i) для указания временно́й последовательности событий приходится либо вносить дополнительный элемент-стрелку (*рисунок 2б*), либо принимать такой порядок по умолчанию (например, сверху вниз или слева направо).



а) независимые события б) сценарий

Рис. 2. Элемент «И» для отображения последовательной структуры событий

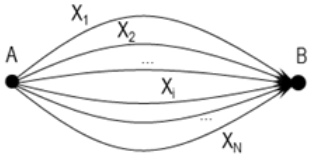


Рис. 3. Параллельная структура событий

События $\{X_i\}$ образуют параллельную – дизъюнктивную – структуру, если реализация любого из них приводит к реализации события X. Поэтому X можно изобразить графом, представляющим собой ребра, концы которых соединений параллельно, причем каждая дуга изображает одно событие X_i (*рисунок 3*).

В силу коммутативности операции логического сложения (дизъюнкции), порядок событий для формулы (10) значения не имеет. Для графического отображения этой ситуации FTA использует элемент, не предполагающий указания временной соотнесенности событий (*рисунок 4*).

Однако этот образ очень беден для передачи всего богатства условий на реализацию событий с квазипараллельной структурой.

Построение сценария

Решение задачи обеспечения защищенности ЗО начинается с построения события E_0 = (ЗЗО=ИСТИНА; ЗЗО=ЛОЖЬ; X_0) ≡ НЗЗО, соединяющего два состояния – начальное $ЗЗО_{Start}$ (в котором его защищенность не нарушена) и конечное $ЗЗО_{Finish}$. Сценарий редко описывает непосредственное воздействие источника угрозы (как бы его не понимать) на ЗО, чаще всего сценарий есть ряд последовательных переходов между состояниями, каждое из которых приближает злоумышленника к цели – переводу ЗО в состояние НЗЗО. Основная проблема, стоящая перед разработчиком – построить цепочку событий, которые через ряд состояний приведут к переходу в состояние ЗЗО=ЛОЖЬ (см. *рисунок 1*).

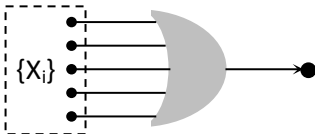


Рис. 4. Элемент «ИЛИ» для отображения параллельной структуры событий

Декомпозиция событий

Рассмотрим методы построения структуры событий, происходящих с ЗО. Начнем с одного события X, которое поначалу мы рассматриваем как элементарное, не имеющее никакой структуры. Оно характеризуется своим индикатором I, который есть простейшая индикаторная функция $I_X \equiv I$ системы, состоящей только из одного события.

Рассматривая композицию двух событий в одно в «обратном направлении», мы получим правила декомпозиции элементарного события (*таблица 4*).

Декомпозиция элементарного события в нашем понимании – это представление простого события в виде сложного на основании только одного правила: X можно представить либо как сумму, либо как произведение нескольких X_i. Графически это означает, что элемент на рисунке (18) можно «усложнить» либо в структуру рисунка (19), либо в структуру рисунка (20).

Для вариантов 1 и 2 логическая функция этого элемента F_X будет либо конъюнкцией, либо дизъюнкцией логических функций F_{Xi}. В 3-м варианте появляется операция отрицания события. Эта операция логически достаточно сложна – и разработчик декомпозиции должен ясно и недвусмысленно зафиксировать условия реализации события X. Как видим, несовместность событий усложняет СФС, не усложняя ИФС.

Следующий шаг декомпозиции проводит к появлению все более сложных структур. Например, см. *рисунок 5*.

Аналогичные соображения позволяют производить декомпозицию и на несколько событий $\{X_i\}$ с соответствующими структурными функци-

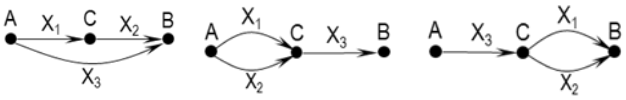


Рис. 5. Двухшаговая декомпозиция

Таблица 4

Декомпозиция на два события

	Исходное событие	Декомпозиция		
		последовательная	параллельная	
			ИЛИ	Строгое ИЛИ
Граф	A X B (18)	A X1 C X2 B (19)		A X1 B / X2 (20)
№ варианта		1	2	3
СФС	X	$X_1 \cdot X_2$	$X_1 + X_2$	$X_1 \oplus X_2 = X_1 \cdot X`_2 + X`_1 \cdot X_2$
ИФС	I	$I_1 \cdot I_2$	$I_1 + I_2 - I_1 \cdot I_2$	$I_1 + I_2 - 2 \cdot I_1 \cdot I_2$
ВФС	P	$r_1 \cdot r_2$	$r_1 + r_2 - r_1 \cdot r_2$	$r_1 + r_2 - 2 \cdot r_1 \cdot r_2 = r_1 \cdot q_2 + r_2 \cdot q_1$

ями из *таблицы 2*. Очевидно, что наибольшую сложность представляет получение СФС и ИФС для квазипараллельных структур событий.

Вводимые так события $\{X_i\}$ всегда будут различными – у них будут разные характеристики – имена, начальное/конечное состояния, индикаторы и пр. Поэтому функция F_X будет бесповторной – каждое событие X_i будет входить в нее только один раз. Основная же «неприятность» в том, что ВФС нельзя получить из ИФС простой заменой индикаторов событий на их вероятности.

Развилки и слияния

Логически нет оснований полагать, что разные события $\{X_i\}$, которые могут происходить с объектом, находящимся в некотором состоянии S_S, будут переводить его в одно и то же состояние S_F. Куда более естественна ситуация *развилки*, в которой каждое из событий X_i переводит объект в состояние $S_{F(i)}$ (*рисунок 6а*).

Аналогично получаем и ситуацию *слияния*, в которой объект оказывается в одном и том же конечном состоянии S_F, переходя в него из различных начальных $S_{S(k)}$ (*рисунок 6б*).

Обе эти структуры активно исследуются: развилка – в анализе дерева событий (Event Tree Analysis, ETA), слияние – в анализе дерева отказов (Fault Tree Analysis, FTA), а вместе – в анализе видов и последствий отказов (Failure Mode and Effects Analysis, FMEA). Соответственно, наработанные в этих методиках приемы могут существенно помочь в решении нашей задачи – построении модели защищенности ЗО.

Событие с мостиковой структурой

Построение системы событий, включающей развилки и слияния, может привести к ситуации, когда два (или более) сценария проходят через одни и те же состояния. Так образуется *сеть* событий (*рисунок 6в*).

Простейшая такая сеть – *мостиковая* схема. Она возникает, например, при описании путей проникновения из помещения А в помещение В (*рисунок 7а*).

Построим СФС для мостиковой структуры (*рисунок 7б*). От начального состояния A к конечному B возможны 4 сценария перехода (их обычно называют *кратчайшими путями успешного функционирования* (КПУФ), *таблица 5*).

Таблица 5

КПУФ мостиковой структуры

№	Сценарий	СФС
1	$A <_t C <_t D <_t B$	$X_1 \cdot X_6 \cdot X_4$
2	$A <_t C <_t B$	$X_1 \cdot X_3$
3	$A <_t D <_t B$	$X_2 \cdot X_4$
4	$A <_t D <_t C <_t B$	$X_2 \cdot X_5 \cdot X_3$

СФС для события $(A; B; X)$, в соответствии с *рисунком 8* представляет собой ДНФ (дизъюнктивную нормальную форму) – дизъюнкцию всех путей-сценариев (каждый из которых есть конъюнкция):

$$X = X_1 \cdot X_6 \cdot X_4 + X_1 \cdot X_3 + X_2 \cdot X_4 + X_2 \cdot X_5 \cdot X_3 \qquad (21)$$

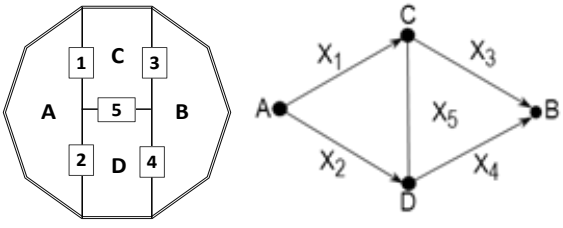
Эта формула в дизъюнктивной нормальной форме (ДНФ) описывает 4 совместных события-сценария, что делает громоздким прямое применение формулы сложения вероятностей.

Теорема о разложении булевой функции по одному из аргументов позволяет представить СФС как сумму

$$F_X(X_1,X_2,X_3,X_4,X_5) = X_5 \cdot F_X(X_1,X_2,X_3,X_4,1) + X_5' \cdot F_X(X_1,X_2,X_3,X_4,0) \qquad (22)$$

События X_5 и X_5' можно рассматривать как гипотезы ($H_1 = (I_5 = 1)$ – событие X_5 реализовалось, $H_2 = (I'_5 = 1) = (I_5 = 0)$ – событие X_5 не реализовалось). Структура и формулы событий для данных гипотез представлены в *таблице 6*.

Граф полученной СФС представлен на *рисунке 9в*.



а) б)

Рис. 7. Мостиковая структура событий

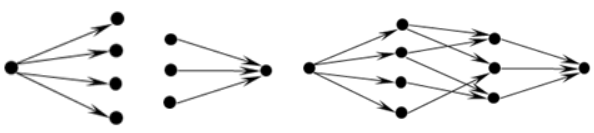


Рис. 6. Переходы с многими состояниями

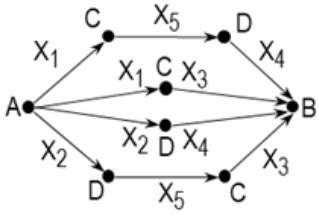
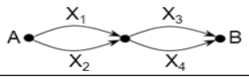
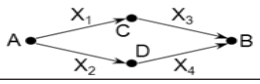


Рис. 8. Сценарии мостиковой структуры

Таблица 6

Гипотезы H_1 и H_2

Гипотеза	Структура	СФС
$H_1=(I_5=1)$		$Y_1=X(AB\|H_1)=(X_1+X_2)\cdot(X_3+X_4)$
$H_2=(I_5=0)$		$Y_2=X(AB\|H_2)=X_1\cdot X_3+X_2\cdot X_4$

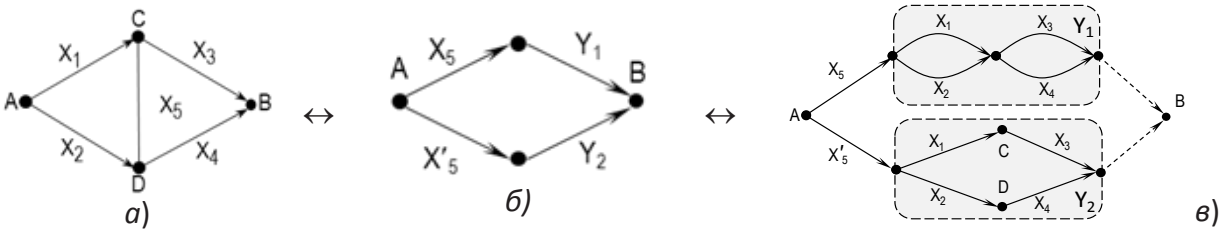


Рис. 9. Преобразование СФС с мостиковой структурой.

В соответствии с правилами *таблицы 4* получим ИФС:

$$I_X = I((X_5\cdot Y_1)+(X'_5\cdot Y_2)) = \ldots = I_5\cdot I_{Y_1} + I'_5\cdot I_{Y_2} = \\ = I_5\cdot(I_1+I_2-I_1\cdot I_2)\ (I_3+I_4-I_3\cdot I_4)+I'_5\cdot(I_1\cdot I_2+I_3\cdot I_4- \\ -I_1\cdot I_2\ I_3\cdot I_4) \qquad (23)$$

Структурно сложные системы событий

Отметим особенности мостиковой структуры:

- различные сценарии могут проходить через одни и те же состояния ↔ событие X_i может участвовать в нескольких сценариях;
- в сценариях участвуют и само событие X_i, и его отрицание X'_i.

Эти же особенности присущи событиям квазипараллельного типа (см. [8]). Получение СФС для них сопряжено с большими трудностями, поэтому такие системы событий принято называть *структурно сложными системами* (событий). В общей логико-вероятностной модели [5] утверждается: «*Под структурно-сложными системами мы будем понимать такие системы, которые при математическом описании не сводятся к последовательным, параллельным или древовидным структурам. Структурно-сложные системы (ССС) описываются сценариями сетевого типа с циклами и неустранимой повторностью аргументов при их формализации*».

Структурно простые системы могут быть получены при декомпозиции исходного события по правилам *таблицы 4*, причем с использованием только нестрогого ИЛИ – порождаемые так сценарии не содержат ни общих состояний, ни отрицаний событий.

Заключение

Построение СФС – первый этап построения модели защищенности объекта. Приведенные в работе соображения и формулы служат основой для решения основной задачи – построения ИФС и ВФС. Принципы и методы ее решения на этих этапах мы рассмотрим в следующей статье.

Литература

1. ГОСТ Р 51897-2011. Менеджмент риска. Термины и определения.
2. ГОСТ 27.002-2015. Межгосударственный стандарт. Надежность в технике. Термины и определения.
3. Шевченко Е.Н. Математическое моделирование распределения риска при независимых случайных величинах вероятностей исходных событий и ущерба // Фундаментальные исследования, 2011, №12-3. С.604-608.
4. Барлоу Р., Прошан Ф. Математическая теория надежности: Пер. с англ. М.: Сов. радио, 1969. 488 с.
5. Рябинин И. А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. СПб.: Политехника, 2000. 248 с.: ил.
6. Умнов А.Е. Методы математического моделирования: Учебное пособие. М.: МФТИ, 2012. 295 с.
7. Самарский А. А., Михайлов А.П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. 2-е изд., испр. М.: Физматлит, 2001. 320 с.
8. Бутрина Е.П., Олейников В.П. Защищенность – объекты и события // Известия Института инженерной физики, 2021. №2(60). С. 86-90.

УДК 629.7

ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДВОЙНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

OPTIMIZATION OF THE COMPOSITION OF THE ORBITAL CONSTELLATION OF DUAL-PURPOSE SPACECRAFT

Владимир Леонидович Захаров
доктор военных наук, профессор
действительный член АВН
профессор кафедры
ФГБОУ ВО МАИ (НИУ)
Адрес: 125993, Москва,
Волоколамское шоссе, д. 4
Тел.: +7 (905) 566-17-94
E-mail: varahas@yandex.ru

Рафаэль Рамисович Казаков
кандидат технических наук
доцент кафедры бортовых информационных и измерительных комплексов космических аппаратов ВКА имени А.Ф. Можайского
Адрес: 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13
Тел.: 8 (812) 237-12-49

Дмитрий Вячеславович Смирнов
почетный работник науки и техники РФ
доктор технических наук, доцент
действительный член АИН
профессор кафедры
ФГБОУ ВО МАИ (НИУ)
Первый Вице-президент Института – заместитель Председателя Правления Института МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7 (4967) 35-31-93
E-mail: dv_smr@iifmail.ru

Аннотация
В статье произведена декомпозиция задачи оптимизации состава орбитальной группировки космических аппаратов двойного назначения. Приведены формализованная и математические постановки задачи исследований. Рассмотрены основные особенности использования подобных орбитальных группировок космических аппаратов.
Ключевые слова: информационные космические системы, космический аппарат двойного назначения, околоземное космическое пространство, космический мусор, орбитальная группировка, средства выведения.

Summary
The article contains a decomposition of the optimization problem for the composition of the orbital constellation of dual-purpose spacecraft. The formalized and mathematical formulations of the research problem are presented. The main features of the use of such orbital constellations of spacecraft are considered.
Keywords: information space systems, dual-purpose spacecraft, near-earth space, space debris, orbital constellation, launch vehicles.

Введение

Анализ современных взглядов на ведение войны показывает, что эффективность боевого применения средств вооруженной борьбы, согласованность действий частей и подразделений в значительной мере зависят от информационных космических систем (ИКС), которые влияют на качество управления при ведении боевых действий.

Развитие и эффективное использование ИКС с орбитальными группировками (ОГ) малых космических аппаратов (КА) является одним из

перспективных направлений информационного обеспечения потребителей различных классов. Опыт локальных войн и конфликтов последних лет свидетельствует о том, что в обеспечении успехов современных операций большую роль играет возможность подавления ИКС противника. Применение такой стратегии способствует существенному снижению эффективности группировок войск и сил флота противника в оперативном и тактическом звене. Требуется создание средств противоспутниковой борьбы.

Наряду с тем, что в настоящее время большое количество исследований посвящены борьбе с космическим мусором (КМ), объемы которого занимают не малый процент околоземного космического пространства (ОКП) [1], возникает задача создания КА, который сможет решать следующие задачи:

- в мирное время – очистка ОКП от КМ и других мелких частиц, а также вышедших из строя КА;
- в военное время – борьба с ИКС противника путем вывода из строя или увода с активных орбит КА противника (КАП), входящих в ее состав.

Предлагается разработать КА двойного назначения (ДН), способного решать задачи различного характера и в различных условиях обстановки. Для увеличения оперативности решения целевых задач такими КА, необходимо их использовать в виде ОГ, которая будет развертываться, а при необходимости восполняться в несколько этапов за счет групповых запусков.

Анализ научно-технической литературы показал, что существующие методы обоснования способа применения ОГ КА ДН описаны для маневрирующих КА, требующих больших запасов характеристической скорости на борту, что ведет к существенному увеличению массо-габаритных характеристик данных КА. Указанная особенность существенно ограничивает возможности применения подобных комплексов в средней и дальней операционных космических зонах, а также использование малых КА для достижения поставленных целей. Тем самым обоснована актуальность разработки методов безманевренной доставки КА ДН в заданную ОКП с целью выполнения задач захвата и перевода на неактивную орбиту КМ или КАП в зависимости от условий обстановки.

Особенности применения орбитальной группировки космических аппаратов двойного назначения

Анализ способов поражения КА, а так же, существующих и перспективных средств поражения КА показал, что наиболее удовлетворяющим сформулированным требованиям противоспутниковым средством космического базирова-

Рис. 1. Декомпозиция задачи обоснования способа применения ОГ КА ДН

ния, на сегодняшний день, является кинетическое оружие, действие которого на различные бортовые системы и элементы конструкции КА потенциального противника основано на кинетической энергии поражающего элемента (ПЭ). Данному вопросу посвящено множество научных трудов [2-4]. Однако такой подход к борьбе с КАП имеет ряд недостатков:

- необходимость иметь на борту КА большого объема ПЭ, что неизменно приводит к увеличению массо-габаритных характеристик КА;
- особые требования к точности систем наведения, а также прогнозированию дальнейшей траектории движения ПЭ для исключения нанесения вреда собственным КА и КА союзников;
- в случае успешного поражения КАП увеличение числа КМ в ОКП.

Наиболее выигрышным является борьба с КАП и КМ следующими способами:

- при сближении с КАП (КМ) произвести его захват с помощью манипулятора и вывести его на неактивную орбиту, затем вернуться в заданную точку ОКП;
- в случае нехватки рабочего тела для дальнейшего функционирования на активной орбите после захвата КАП (КМ) направиться вместе с ним в плотные слои атмосферы.

На основании вышеизложенного сформулирована содержательная постановка задачи исследования, суть которой заключается в следующем. Для обоснования рационального состава ОГ КА ДН

1. Необходимо решить задачу определения максимального числа КАП (КМ), которые способен поразить один КА ДН заданных параметрах перспективной баллистической системы ОГ.

2. Требуется обосновать требования к области ОКП для поражения назначенных КАП с заданной вероятностью.

Математическая постановка задачи оптимизации состава ОГ КА ДН

На *рисунке 1* представлена декомпозиция поставленной задачи.

Математическая постановка задачи оптимизации состава ОГ КА ДН с учетом ограничений по масштабности, скрытности, ресурсоемкости, глобальности, оперативности.

Дано:

Пространственно-баллистическая модель операции перехвата ОГ КА ДН:

Параметры космической обстановки:

$S_{КА}=\{N_{КАДН}, X_{КАДН}\}$ – ОГ КА ДН из $N_{КАДН}$ КА ДН, начальное положение которых задано матрицей $X_{КАДН}$.

Параметры средств выведения (СВ) КА ДН:

$K_{СВ}$ – количество типов средств выведения, привлекаемых к операции;

$(\varphi_{СТАРТА\,k}, \lambda_{СТАРТА\,k})$ – координаты стартовых позиций СВ различных типов, $k=1,\ldots, K_{СВ}$;

$$\pi_k=\left[\Delta i_{ОРБ.k}; \Delta r_{КРУГОРБ.k}; \Delta t_{ПОЛЕТАk}\left(\Delta r_{КРУГОРБ.k}\right); \Phi_{ПОЛЕТАk}\left(\Delta r_{КРУГОРБ.k}\right)\right]^T -$$

векторы параметров, определяющие области выведения для различных типов СВ.

Временные ограничения операции:

t_0 – момент начала операции;

$\Delta t_{ПРЕД.ОП}$ – предельная длительность операции.

Требуется:

1) Найти минимальное количество КА ДН $N_{КАДН}$, необходимое для обеспечения поражения всей ОГ КАП при использовании минимального количества витков $S_{КАДН}=\{N_{КАДН}, X_{КАДН}\}$, в которой начальное положение КА ДН задано матрицей $X_{КАДН}$.

2) Найти вариант целераспределения КА ДН:

$$Z^* = \arg \max_{Z_{\langle N_{КА\,ДН}, N_{КА\,ДН}\rangle}} P_{ПЦ\,СРЕДН.}\left(Z_{\langle N_{НК\,ДН}, N_{КА\,ДН}\rangle}\left(S_{КАП}\right)\right),$$

максимизирующий среднее значение $P_{ПЦ\,СРЕДН.}$ вероятностей захвата всех КАП вражеской ОГ в заданных параметрах космической обстановки.

3) Длительность операции в целом:

$$\Delta t_{ОП.} = \max_{j=1,\ldots,N_{КА\,ДН}} t^*_{ВЫВЕД\;i\,j} - t_0 .$$

Заключение

Вопросы очистки ОКП от загрязнений в виде КМ и КО в настоящее время являются наиболее актуальными. Гонка космического вооружения с каждым годом набирает все большие обороты, не смотря на ограничения. Приоритетными являются все меньшие по массо-габаритным характеристикам КА, при этом большинство из них проектируется как многофункциональные. Однако, ситуация в ОКП не улучшается и все принятые меры только позволяют выиграть время [1].

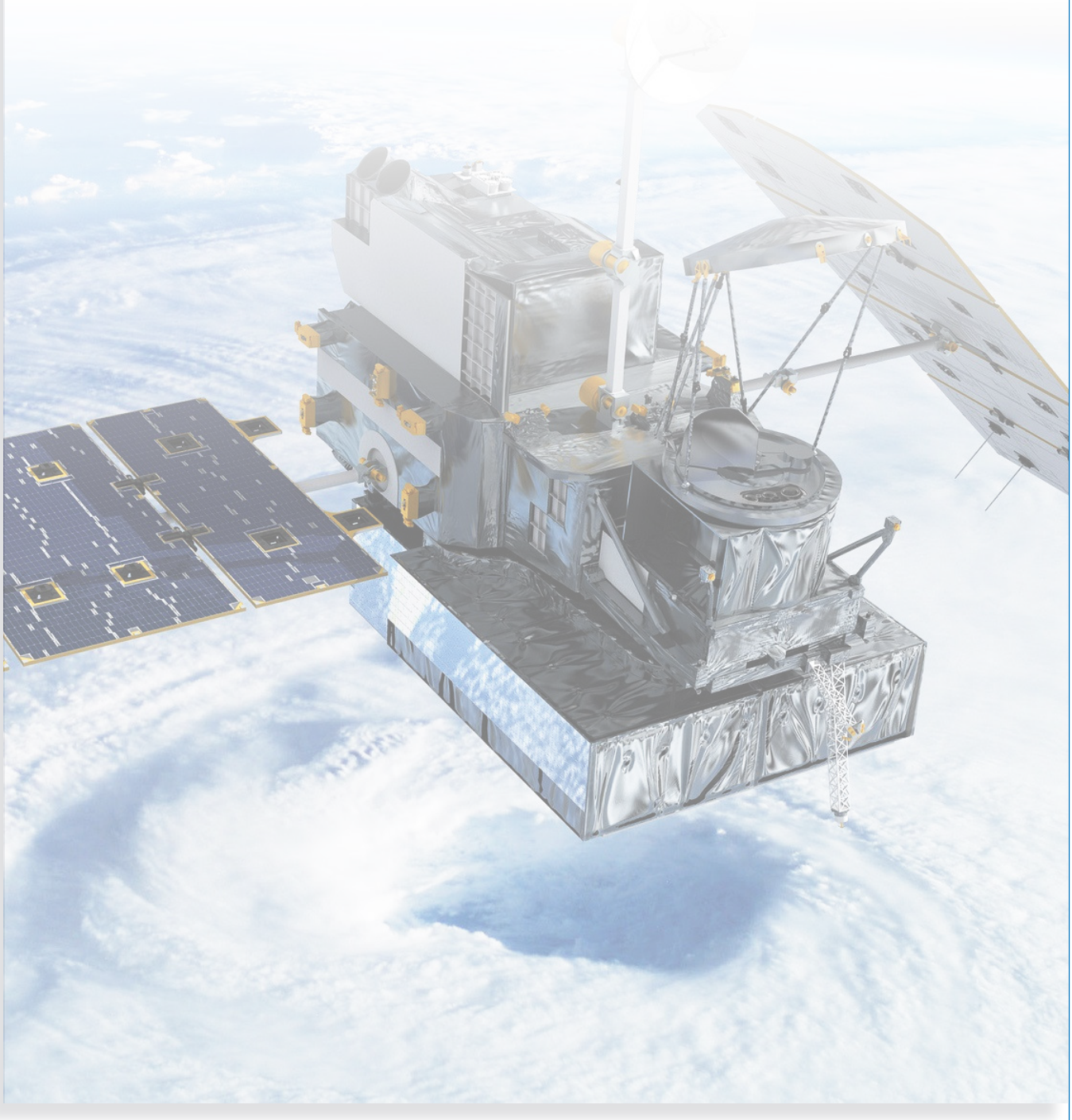
Рассмотренный в статье способ борьбы с КМ и КО при условии решении задачи оптимизации состава ОГ КА ДН, позволит обеспечить РФ ОГ, способной при угрозе столкновения с КМ критически важных КО [5], вывести обломки или крупные осколки из зоны потенциального столкновения. При этом планируется выведение в такую ОКП, которая исключит возникновение подобных ситуаций в дальнейшем.

При резком изменении военно-политической обстановки в мире и возникновении вооруженных конфликтов как на Земле, так и за ее пределами, такие КА способны обеспечить

военное превосходство РФ в ОКП за счет вывода с активных орбит КА ИКС враждующих государств.

Литература

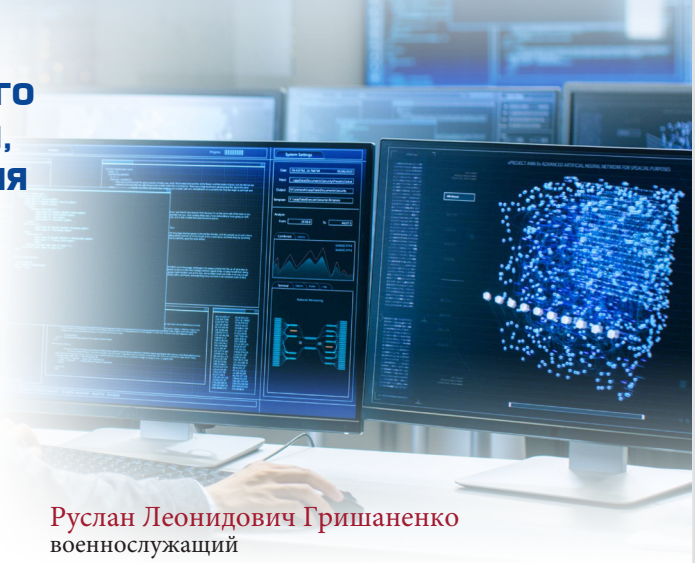
1. Казаков Р.Р., Мингалиев Э.Р. Анализ влияния космического мусора на безопасность космических полетов // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России, 2015. №3(127). С.77-87.
2. Антонов А.И. Контроль над вооружениями: история, состояние, перспективы. М.: РОССПЭН, 2012. 245 с.
3. Веселов В.А. Трансформация стратегической стабильности: роль технологического фактора // Вестник Московского университета. Серия 25: Международные отношения и мировая политика, 2015. №3. С.23-56.
4. Козин В.П. Проблема предотвращения размещения оружия в космосе: сравнительный анализ позиций США и России // Проблемы национальной стратегии, 2021. №2(11). С.77-97.
5. Баллистика и навигация космических аппаратов: учебник для вузов / Н.М. Иванов, Л.Н. Лысенко. 3-е изд. Перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2016. 523 с.



УДК.004.056.53

БЕЗОПАСНОСТЬ СИСТЕМ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ. ЗАЩИЩАЕМЫЕ АКТИВЫ, УЯЗВИМОСТИ, МОДЕЛЬ НАРУШИТЕЛЯ И УГРОЗ, ТАКСОНОМИЯ АТАК

MACHINE LEARNING SYSTEMS SECURITY. PROTECTED ASSETS, VULNERABILITIES, INTRUDER AND THREAT MODEL, ATTACK TAXONOMY



Вадим Геннадьевич Грибунин
почетный работник науки и техники РФ
доктор технических наук
главный научный сотрудник
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой ударный пер., д. 1а
Тел.: 8 (4967) 35-31-93

Руслан Леонидович Гришаненко
военнослужащий

Андрей Петрович Лабазников
военнослужащий

Андрей Александрович Тимонов
военнослужащий

Аннотация
В статье приведены защищаемые активы, уязвимости системы машинного обучения, как объекта защиты. Рассмотрены состояние дел в данной области, даны предложения по использованию терминологии. Приведена модель нарушителя и угроз, уточнена известная таксономия атак.
Ключевые слова: безопасность машинного обучения, классификатор, модель, атаки, уязвимость, таксономия.

Summary
The article lists the assets to be protected, the vulnerabilities of the machine learning system as an object of protection. The state of affairs in this area is considered, proposals for the use of terminology are given. A model of the intruder and threats is presented, the well-known taxonomy of attacks is refined.
Keywords: machine learning security, classifier, model, attacks, vulnerability, taxonomy.

Введение

В последние годы достигнуты существенные успехи в области применения машинного обучения (а именно, моделей глубокого обучения)[1] для обработки изображений и естественного языка. Это породило многочисленные исследования по использованию СМО в целях решения широкого круга задач: диагностики заболеваний в медицине, демодуляции сигналов, управления мощностью передатчика и множественным доступом к ресурсу в радиосвязи, управления сетями передачи данных, обнаружения спама, вторжений и вредоносного программного обеспечения и многих других задач.

СМО начинают применять в ответственных приложениях, например, на транспорте, где важными являются вопросы функциональной и информационной безопасности их использования. Обеспечение обеих типов безопасности для СМО имеет свою специфику, в настоящей статье мы будем рассматривать только информационную безопасность (ИБ).

Так как СМО реализуются программным путем, то для них характерны все уязвимости, угрозы и атаки, как и для традиционных информационных систем. Вместе с тем, имеется целый ряд специфичных уязвимостей, которые позволяют нарушителю реализовывать новые, не встречавшиеся ранее, угрозы ИБ в виде атак. Далее будут рассматриваться только специфичные уязвимости, угрозы, атаки. Эти угрозы зачастую представляются настолько критичными, что способны поставить под сомнение целесообразность использования СМО в ответственных решениях. Поэтому изучение ИБ СМО, исследование атак и разработка способов защиты от них является исключительно важной задачей.

На этой задаче сфокусировано внимание

[1] Далее для систем машинного и глубокого обучения введем обозначение СМО

многих исследователей. Так, только на сайте arxiv.org за последние 5 лет размещено более 500 препринтов по данной тематике. Ежегодно проводятся различные конференции по данной тематике. NIST разработан проект документа [1], в котором предложена таксономия и терминология понятий в данной области. MITRE разработана матрица атак на СМО [2]. DARPA ведет проект GARD [3] по исследованиям в данной области. Авторам известны также две книги, изданные по данной тематике [4,5].

На русском языке тематика ИБ СМО освещена, в основном в блогах компаний Digital Security и Positive Technologies на ресурсе habr.com. Положение частично исправило издание переводной книги [6].

Целью настоящей статьи является предложить русскоязычную терминологию в данной области, уточнить и обобщить приведенные в различных публикациях модели нарушителя и угроз, таксономию атак.

При дальнейшем изложении будем считать, что СМО выполняет функцию классификации. Это – наиболее часто встречающееся применение СМО, хотя большинство приведенного материала справедливо и для других типов систем.

На *рисунке 1* показан пример атаки на систему классификации изображений, заключающейся в добавлении к изображению невидимому для человеческого глаза шума.

Атаки против систем классификации изображений наиболее наглядны, но атаки существуют против практически любых приложений СМО. Например, на *рисунке 2* показана атака на СМО преобразования речи в текст.

Прежде, чем перейти к описанию терминологии в рассматриваемой области, приведем схематическое изображение объекта защиты.

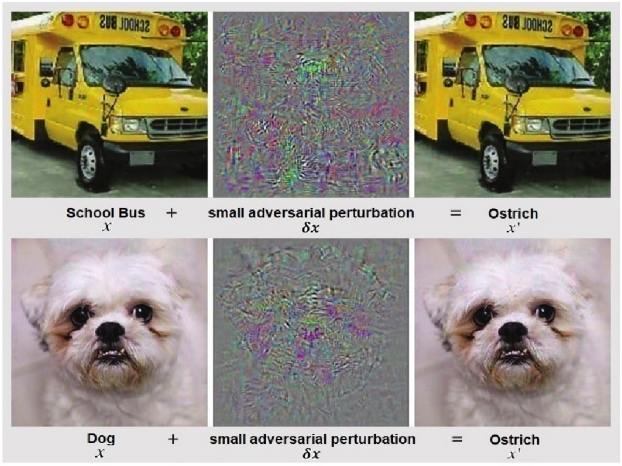


Рис.1. Пример атаки на СМО [7]. Немного искаженные изображения автобуса и собаки классифицируются как изображения страуса

1. СМО, как объект защиты. Уязвимости СМО

Как показано на *рисунке 3*, обычно, этапы обучения и применения СМО разделены, и в эксплуатации используется уже обученная модель (этап валидации на рис.1. не показан). Хотя имеет место быть и так называемое онлайн-обучение, когда при функционировании по назначении классификатор постоянно или периодически дообучается на вновь поступающих данных. Забегая вперед, отметим, что именно для таких СМО характерны атаки через воздействие на данные обучения.

На вход модели поступают признаки (низкоуровневые), являющиеся отражением тех или иных объектов физического мира. Процесс получения признаков делится на два подпроцесса: измерение реально существующих величин и их преобразование. Признаки являются выборкой из некоторой генеральной совокупности (ГС), вся ГС недоступна для обучения. Например, если в качестве признаков используется растровое полутоновое изображение размером

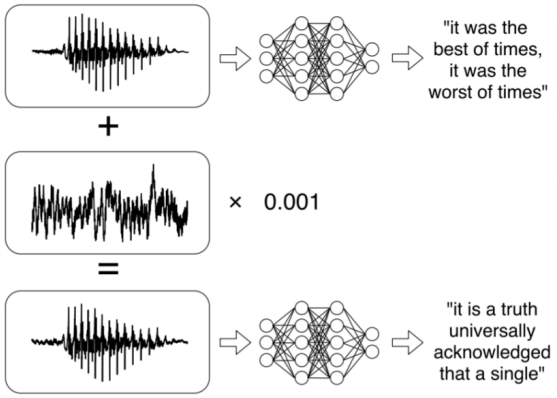


Рис.2. Пример атаки на СМО преобразования речи в текст [8]. Практически незаметные на слух искажения речи приводят к получению полностью другого, желательного нарушителю, текста

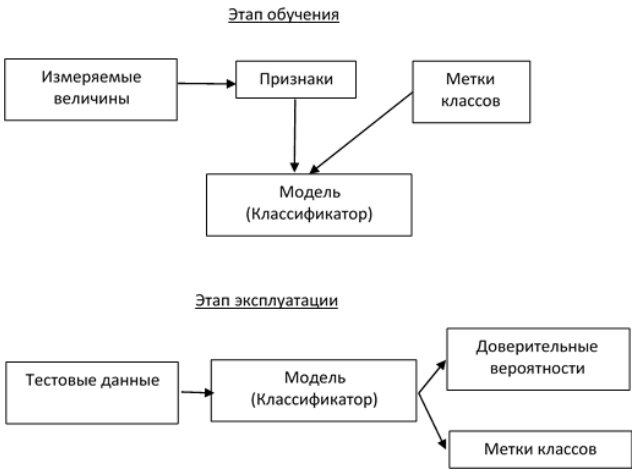


Рис. 3. Типовая структура системы машинного обучения

512x512, то множество ГС будет иметь мощность $8^{512*512}$, так как именно столько полутоновых изображений данного размера существует.

Признаки являются совокупностью векторов, каждый из которых описывает точку в многомерном пространстве.

Модель включает в себя множество гиперпараметров и параметров. Гиперпараметры не изменяются в ходе обучения (например, вид и число слоев нейросети, связей между ними, вид функции активации и т.п.). К параметрам нейросети относятся веса и смещения нейронов, они настраиваются в ходе обучения. Гиперпараметры еще называют архитектурой модели.

Задачей модели является адаптация (правильная классификация) к присутствующим в обучающей выборке векторам (свойство выразительности модели) и, одновременно, она должна быть способной к обработке других векторов, чье вероятностное распределение близко к распределению векторов в обучающей выборке (свойство обобщающей способности модели). Эти два требования отчасти противоречат друг другу: хорошо адаптированная к обучающим данным модель может оказаться неспособной к обобщению (это называется переобучением модели). И наоборот: простые, например, линейные модели, хорошо обобщают новые данные, но плохо отражают структуру обучающей выборки (недообучение модели).

Помимо данных на вход модели обычно поступает и дополнительная информация: метки классов (обучение с учителем), штрафы и поощрения со стороны среды за ранее принятые решения (обучение с подкреплением).

Выход модели отражает точную или вероятностную принадлежность признака к тому или иному классу.

Защищаемыми активами СМО могут являться:

- результаты измерений, из которых получены данные для обучения;
- алгоритмы получения признаков из результатов измерений;
- алгоритмы обучения модели;
- значения гиперпараметров модели;
- значения параметров обученной модели;
- вероятности принимаемых решений (на выходе классификатора);
- сами принимаемые классификатором решения.

Главным защищаемым активом СМО является полученная в ходе обучения граница принятия решений (гиперплоскость в n-мерном пространстве). Большинство атак нарушителя направлено на то, чтобы как можно более точно оценить эту границу.

Принципиальной и неустранимой уязвимостью СМО является то, что выборка обучающих данных в общем случае не может отражать всего разнообразия данных ГС. Это дает возможность нарушителю подобрать такие входные данные из ГС, на которых СМО будет выдавать некорректные результаты.

Другой уязвимостью СМО является то, что процесс обучения и дальнейшего принятия решения во многом скрыт от разработчика системы. В ходе обучения СМО может «обращать внимание» совсем не на те признаки, какие имелись в виду разработчиками, и научиться совсем не тому. Развитие методов и способов интерпретируемого (объяснимого) обучения позволяет надеяться на то, что эта уязвимость будет закрыта.

Еще одной уязвимостью является то, что параметры обученной модели отражают информацию об обучающих данных, что делает потенциально возможным их получение путем реверс-инжиниринга.

Также к уязвимости СМО можно отнести сравнительную легкость получения «теневой», или суррогатной модели за счет изучения данной модели, как «черного ящика». Защитой здесь является скрытие решений модели от нарушителя или его дезинформация.

2. Особенности терминологии в области безопасности СМО

В англоязычной литературе в рассматриваемой предметной области широко используется прилагательное «adversarial». Предлагается переводить это слово на русский язык по-разному, в зависимости от контекста, как это представлено в *таблице 1*.

Другая терминология будет приведена в настоящей статье при описании модели нарушителя, угроз и атак.

3. Модель нарушителя СМО

Целесообразно предположить, что нарушителем СМО является квалифицированный программист, знакомый с методами и алгоритмами различных СМО, методами и способами осуществления атак на них. Он обладает техникой с достаточными вычислительными возможностями для построения и анализа СМО, создания контрпримеров и осуществления атак.

По отношению к аппаратно реализованным (встроенным) СМО предполагается, кроме того, что нарушитель знаком с методами инвазивного и неинвазивного анализа средств криптографической защиты (так как в методах анализа много общего).

Можно выделить пять основных мотивов дей-

ствий нарушителей, в зависимости от которых он может ставить перед собой различные цели:

- разведка, шпионаж (в отношении модели либо обучающих данных);
- террор (особенно в отношении систем, куда встроены СМО);
- обман или дезориентация защитных механизмов, использующих СМО;
- воздействие на решения СМО в целях получения выгоды;
- любопытство, стремление самоутвердиться.

Нарушитель может ставить перед собой цели (одну или несколько) достигнуть:

- получения обучающих данных, параметров и гиперпараметров модели (атака на конфиденциальность СМО);
- некорректной работы СМО, заключающейся в ложноотрицательных срабатываниях (например, пропуске образцов вредоносного обучения, атак и т.п.) – атака на целостность СМО. Ставя перед собой такую цель нарушитель, как правило стремится, чтобы СМО некорректно классифицировала конкретные векторы входных данных;
- некорректной работы СМО, заключающейся в ложноположительных срабатываниях (например, в генерации многочисленных событий безопасности) – атака на доступность СМО. Ставя перед собой такую цель нарушитель, как правило стремится, чтобы СМО некорректно классифицировала произвольные векторы входных данных;
- получения знания о присутствии каких-либо конкретных данных в составе обучающей выборки – атака на приватность СМО.

Выделяют три уровня знания нарушителя об атакуемой СМО [9]:

- «Черный ящик»: нарушитель не знает параметров и гиперпараметров СМО; иногда выделяют «ограниченный черный ящик» и «черный ящик с оценкой» [6], в последнем случае нарушитель имеет доступ к вероятностям выходов;
- «Белый ящик»: нарушитель имеет полную информацию о СМО (например, им является разработчик СМО);
- «Серый ящик»: нарушитель имеет неполную информацию о СМО.

В случаях «черного» и «серого» ящиков обычно предполагается, что злоумышленник может сгенерировать суррогатный[2] набор данных и получить от СМО метки классов для этих данных. Далее он обучает на этих размеченных данных свой, суррогатный, классификатор и оценивает параметры исходной модели.

С точки зрения вмешательства в атакуемую систему нарушители делятся на способных:

- наблюдать за входами/выходами модели в процессе эксплуатации;
- воздействовать на процесс эксплуатации (подавать на вход примеры и контрпримеры);
- воздействовать на процесс обучения (модифицировать либо добавлять входные данные в том числе, за счет атаки на алгоритмы получения признаков);

Таблица 1

Терминология, связанная со словом «adversarial»

Англоязычное наименование	Русскоязычный термин	Пояснение
Adversarial machine learning	ИБ СМО	Это – название рассматриваемой предметной области
Adversarial primer (example)	Контрпример	Специально подобранный вектор, подающийся на вход модели, на котором модель выдает некорректный выход. Как правило, этот вектор незначительно отличается от векторов обучающей выборки
Adversarial attack	Атака на СМО	В широком смысле – любые специфичные атаки. В узком смысле – атаки путем построения контрпримера
Adversarial robustness	Устойчивость к атакам	Имеются в виду атаки на основе контрпримера
Adversarial training	Состязательное обучение	Защитный метод, при котором в обучении используются контрпримеры (что повышает робастность СМО)
Adversarial settings	Враждебная среда	Окружение, в котором нарушитель может взаимодействовать с СМО
Adversarial reprograming	Несанкционированное перепрограммирование	Атака, при которой нарушитель «заставляет» модель выполнять дополнительные функции (не заложенные разработчиком)
Adversarial capabilities	Модель нарушителя	Знания, умения, инструментарий и т.д.

[2] В англоязычных статьях для обозначения этого метода встречаются термины auxiliary, surrogate, substitute; мы решили использовать кальку «суррогатный»

● вести разведку защищаемых активов СМО по утечкам, возникающим в побочных каналах (особенно актуально для встроенных применений);

● использовать инвазивные методы анализа приборов СМО (по аналогии с шифрсредствами).

4. Таксономия атак на СМО

Во многом схожие таксономии атак на СМО представлены во многих работах [10, 11]. Приведем здесь таксономию из проекта документа NIST [1] (*рисунок 4*), а далее дополним ее.

Атаки, выполняемые на этапе обучения, делятся на 2 класса: атаки использования обучающих данных и атаки отравления, которые называются еще каузальными атаками.

В первом случае нарушитель имеет доступ к данным обучения и обучает с их использованием свою суррогатную модель.

Во втором случае нарушитель косвенно или непосредственно влияет на данные или на модель.

В косвенном случае нарушитель модифицирует данные измерений, еще до операции получения признаков.

Непосредственная модификация данных состоит в инжекции дополнительных векторов и манипуляции данными обучения.

При инжекции нарушитель добавляет к (неизменяемым) данным обучения свои собственные данные, пытаясь добиться сдвига границы принятия решений для обучаемого классификатора и, как следствие, его деградации.

При манипуляции нарушитель может непосредственно изменять входные данные, присваиваемые и метки классов, либо даже изменять саму модель («логическая коррупция»).

Атаки этапа эксплуатации (тестирования) еще называют атаками на выходные данные СМО (inference attacks), а также поисковыми или разведывательными атаками (exploratory attacks). Эти атаки делятся на два больших класса: атаки обхода модели (model evasion) и атаки оракула.

Атаки обхода модели (или атаки уклонения) нацелены на некорректную работу СМО. На-

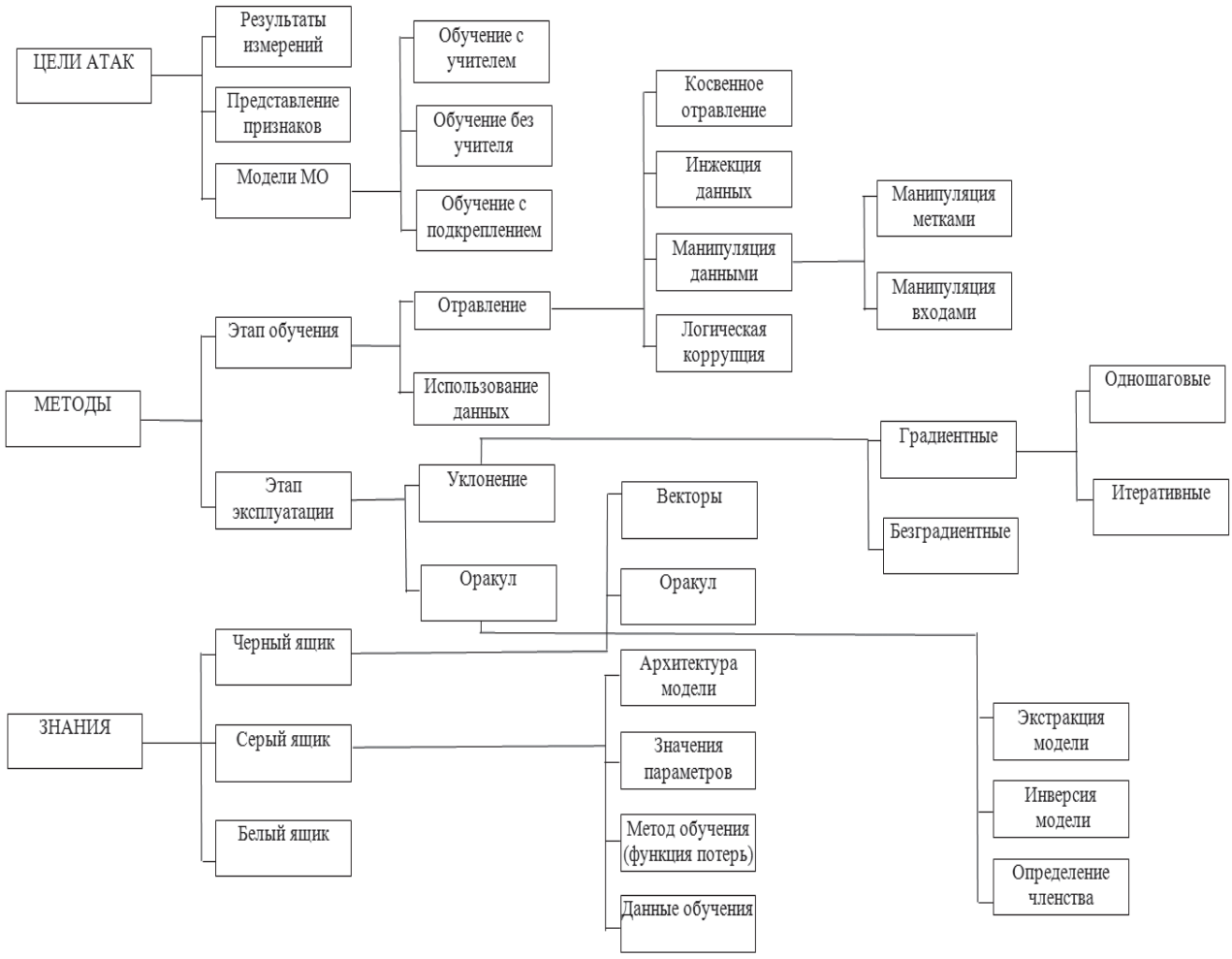


Рис. 4. Таксономия атак на СМО (адаптировано из [2])

рушитель стремится найти такие контрпримеры, которые как можно меньше отличаются от обычных примеров. Сюда относятся такие атаки, основанные на алгоритмах градиентного поиска, как L-BFGS, FGSM, JSMA и другие. Безградиентные методы атак требуют, как правило, знания доверительных вероятностей принимаемых классификатором решений. Также в это класс попадают атаки на основе генетических алгоритмов.

Атаки оракула – это атаки на конфиденциальность или приватность СМО. Они нацелены на получение знаний об атакуемой модели (экстракция модели), о данных обучения (за счет инверсии модели), о присутствии конкретных данных в составе обучающей выборки. Результаты, полученные при проведении атак первых двух подклассов могут быть затем использованы в атаках уклонения.

По сравнению с представленной в [1] таксономией можно предложить дополнительно разделить атаки (причем двумя способами) еще на два класса: целевые и нецелевые атаки.

Понятие «целевые атаки» используются в рассматриваемой области в двух смыслах:

1) как атаки, направленные против конкретного алгоритма, например, графовой нейронной сети;

2) как атаки, направленные на то, чтобы в результате некорректной классификации контрпримеру была присвоена определенная (а не произвольная) метка класса.

В литературе соответствующие атаки называются discriminate/ indiscriminate либо targeted/ non-targeted, и необходимо анализировать контекст, чтобы понять, о чем идет речь.

Важным классификационным признаком атак является то, направлены они против объектов реального мира или против цифровых объектов. В первом случае нарушитель должен принимать серьезные меры по обеспечению робастности своих атак. Кроме того, эти атаки являются, как правило, атаками «end-to-end», то есть не направлены только на СМО.

Кроме того, можно ввести еще один классификационный критерий, в зависимости от того, как выполняется поисковая атака: чисто программными способами или же с привлечением аппаратных средств. В последнем случае можно выделить такие классы атак, как атаки посредством анализа побочных каналов, атаки по потребляемой мощности, атаки посредством внедрения ошибок и т.д. «Аппаратная» атака осуществляется обычно против встроенных СМО.

Полезным представляется также добавить классификацию по желаемому для нарушителя типу некорректной работы модели: атаки, вызывающие ложноположительные или ложноотрицательные срабатывания.

В работе [1] отсутствует также атака перепрограммирования, при которой нарушитель «заставляет» модель выполнять непредусмотренную разработчиком функциональность путем добавления к тестовым примерам некоторых, одних и тех же, векторов [12]. Эта атака относится к классу поисковых.

Предлагается также классифицировать атаки по накладываемым на формирование контрпримера ограничениям: допустимо или нет добавление к векторам случайного шума. Например, при формировании вредоносного скрипта, который должен быть «не замечен» СМО, существуют значительные ограничения на модификацию.

Еще одним категориальным признаком является уникальность или универсальность получения контрпримера. Последнее характерно в основном для систем классификации изображений, когда добавление одного и того же специально подобранного шума к разным изображениям может привести к некорректной работе классификатора.

Переносимость атак (а также контрпримеров) – это тоже сторона универсальности. Переносимая атака (или контрпример), предназначенная для одной системы, может быть применена и против другой СМО.

Атаки «белого ящика» можно разделить на 2 класса: атаки на изменение функции потерь и атаки итеративной оптимизации. Важным случаем атак «черного ящика» являются граничные атаки [6].

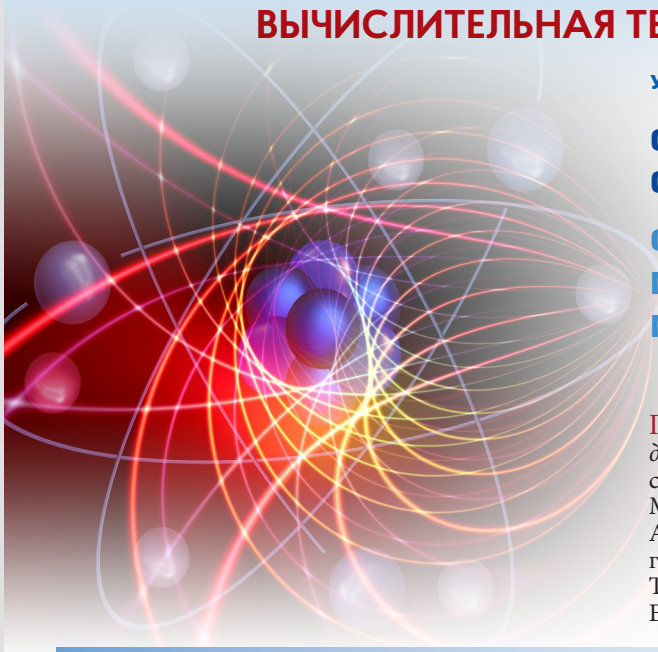
В первом случае нарушитель для получения контрпримера модифицирует входной вектор так, чтобы максимально изменить функцию потерь СМО. В случае нейросети это означает выполнение обратного распространения ошибки для вычисления градиента функции потерь по входному вектору. Нарушитель ищет оптимальное направление, в котором он будет производить изменения.

В атаках итеративной оптимизации также вычисляется градиент. Но далее в них этот градиент не используется непосредственно для модификации входа. Вместо этого решается оптимизационная задача для нахождения такого изменения входа, который бы оптимизировал целевую функцию.

Почти все из рассмотренных классов атак (а также меры защиты от них) реализованы в специальных программных библиотеках, использование которых может помочь оценить безопасность разрабатываемых решений в области СМО.

Литература

1. A Taxonomy and Terminology of Adversarial Machine Learning. Draft NISTIR 8269, October 2019. Режим доступа: https://doi.org/10.6028/NIST.IR.8269-draft
2. Adversarial ML Threat Matrix. December 2020. Режим доступа: https://github.com/mitre/advmlthreatmatrix.
3. Guaranteeing AI Robustness Against Deception (GARD). Режим доступа: https://darpa.mil/program/guaranteeing-ai-robustness-against-deception.
4. Vorobeychik, V., Kantarcioglu, M. Adversarial Machine Learning. Morgan & Claypool Publishers series «Synthesis lectures on artificial intelligence and machine learning». 2018. 169 p.
5. Joseph, A.D., Nelson B., Rubinstein I.P., Tygar, J. D. Adversarial Machine Learning. / A.D. Joseph, B. Nelson, I.P. Rubinstein, J.D. Tygar. - Cambridge University Press. 2019. 339 p.
6. Уорр К. Надежность нейронных сетей. Укрепляем устойчивость к обману. СПб.: Питер, 2021. 272 с.
7. Chakraborty A.A survey on adversarial attacks and defences / A.Chakraborty, M.Alam, V.Dey, A.Chattopadhyay, D.Mukhopadhyay // CAAI Transactions on Intelligence Technology, 2021. V.6. P.25-45.
8. Chen, Y. Practical Adversarial Attacks Against Black Box Speech Recognition Systems and Devices.: PhD Thesis / Chen Yen, - Florida Institute of Technology, 2020. 150 p.
9. Biggioa B. Wild Patterns: Ten Years After the Rise of Adversarial Machine Learning. / B. Biggioa, F. Roli. // Pattern Recognition, 2018. V. 84. P.317-331.
10. Akhtar N. Threat of adversarial attacks on deep learning in computer vision: A survey / N. Akhtar, A. Mian // IEEE Access, 2018. V. 6. P. 14410-14430.
11. Machado G.R. Adversarial Machine Learning in Image Classification: A Survey Towards the Defender's Perspective / G.R. Machado, E. Silva, R.R. Goldschmidt // Preprint. September, 2020. Режим доступа: https://arxiv.org/pdf/2009.0372v1.
12. Elsayed G. Adversarial reprogramming of neural networks / G. Elsayed, I. Goodfellow, J. Suhi-Dickstein. // Preprint. November, 2018. Режим доступа: https://arxiv.org/pdf/1806.11146v2.



УДК 539.182

О КОНТРОЛЕ ЭЛЕКТРОН–ЯДЕРНО–СПИНОВОЙ ДИНАМИКИ В NV–ЦЕНТРАХ

ON THE CONTROL OF ELECTRON–NUCLEAR–SPIN DYNAMICS IN NV–CENTERS

Геннадий Германович Волков
доктор физико-математических наук, профессор
старший научный сотрудник
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967)35-31-93
E-mail: gennadii.volkov@rambler.ru

Аннотация

Дальнейший и значительный шаг к использованию NV-центров в алмазе в реализации функциональной сети квантового повторителя будет зависеть от его реальных возможностей добиться хранения квантовой информации, передаваемой фотонами в точечные спиновые дефекты с такой высокой точностью, чтобы в результате появились возможности для повторного считывания и считывания памяти, необходимых для масштабируемых сетей. Этими проблемами мы начинаем цикл статей, посвященных как уже известным сценариям, в которых эта проблема уже частично решается, так и новым технологическим идеям и разработкам.

Ключевые слова: кубит, спин, электрон, ядро, квантовое запутывание, измерение, считывание, контроль, квантовые сети.

Summary

A further and significant step towards the use of NV-centers in diamond in the implementation of a functional network of a quantum follower will depend on its real ability to store quantum information transmitted by photons to point spin defects with such a high accuracy that, as a result, there will be opportunities for repeated read-out and read-out memory required for scalable networks. With these problems, we begin a series of articles devoted to both already known scenarios in which this problem is already partially solved, and to new technological ideas and developments.

Keywords: qubit, spin, electron, nucleus, quantum entanglement, measurement, readout, control, quantum networks.

1. NV-центры в будущих квантовых ретрансляционных сетях

Сеть квантового повторителя предназначена для распределения запутанности между удаленными узлами, реализующими элементарную квантовую сеть. Квантовый повторитель рассматривается как устройство способное передавать запутанное состояние от одного набора кубитов к удаленному набору без реальной отправки запутанного кубита по квантовой сети.

Для создания квантовой сети требуются источники фотонов (одиночные или запутанные пары), узлы обработки с возможностью совершать оптические или спиновые измерения состояния Белла с достаточно длительным временем когерентности, способностью к очистке запутанности и исправлению ошибок. В качестве многообещающих кандидатов для квантовых ретрансляционных сетей активно рассматриваются твердотельные устройства с хорошо управляемыми электронным и ядерными спинами. Азотная вакансия NV-центра дефекта в алмазе формирует гибридную спиновую систему, в которой электронные спины используются для быстрых высокоточных управлений и считываний, а ядерные спины, хорошо изолированные от окружающей среды, обеспечивают тем самым сверх длительные времена когерентности. Электрон и ядерные спины могут образовывать мелкомасштабный квантовый регистр, позволяя, например, столь важное исправление ошибок при высоком уровне точности. Кроме того, исключительным аргументом является возможность запутывания спина NV-электрона с испускаемым оптическим фотоном.

Популярность NV-центров в алмазе во многом объясняется тем, что считывание его электронного спина является самым прямым действием, благодаря которому интенсивность флуоресценции коррелирует со спиновым состоянием [1-6].

Однако в случае двух-трех и более кубитовой системы оказалось, что применение такого прямого подхода становится крайне неэффективным, поскольку относительный контраст между спиновыми состояниями является кратковременным (около 250 нс) и невысоким (около 30%). Это соответствует одиночному измерению отношения сигнал/ шум (SNR-Sygnal-to-Noise Ratio) 0,05 (0,03) для скорости счета 200 kcps (50 kcps). В результате усреднение от нескольких сотен до нескольких десятков тысяч экспериментальных повторений необходимо для считывания состояния спина с отношением сигнал/шум SNR, равным 1 [6]. Этот пример и многие другие современные эксперименты показывают, что общей проблемой и важнейшим критерием масштабируемой обработкой квантовой информации является надежное измерение квантового состояния. Проблема прецизионных измерений до сих пор остается одной из старейших и наиболее тонких аспектов квантовой теории для многих практических приложений. В ходе этих исследований для измерения спинового состояния NV-центра было разработано несколько методов, которые предлагают определенные преимущества для конкретных обстоятельств [6].

2. Нерезонансное считывание спиновых состояний

Спин-зависимая ФЛ (фотолюминесценция) NV-центра была открыта в первых экспериментах по квантовому контролю при комнатной температуре с одиночными спинами [1,2,3]. Простой подсчет испущенных фотонов ФЛ в первые 300 нс оптического облучения и усреднение по многим циклам, позволяет сделать вывод о проекции спина основного состояния. Эта технология, называемая традиционным считыванием ФЛ, попрежнему широко используется в исследованиях и приложениях. Отрицательно заряженный NV-центр – точечный дефект с симметрией C_{3v}, который демонстрирует изолированные электронные состояния в запрещенной зоне алмаза, включая основное и возбужденное триплетные S=1 состояния. C_{3v} симметрия выделяет направление вдоль кристаллографической <111> оси, соединяющей замещающий азот и прилегающую вакансию. Нарушенная инверсионная симметрия приводит к расщеплению энергии поля между спиновыми уровнями $m_s=0$ и $m_s=\pm1$ в основном состоянии, равному 2,87 ГГц при комнатной температуре. Постоянное магнитное поле, приложенное вдоль оси симметрии дефекта, дополнительно расщепляет уровни $m_s=+1$ и $m_s=-1$. В результате такого расщепления методами спинового резонанса возможно адресовать отдельные переходы между любыми спиновыми уровнями, что разрешает в экспериментальных исследованиях с NV-центрами вместо кутрита использовать кубитовое состояние, охватывающего состояние $m_s=0$ и одну из проекций $m_s=\pm1$. Низкий уровень плотности ядерных спинов в алмазе и слабое спин-фононное взаимодействие позволяют спиновой когерентности NV-центра достигать значения миллисекунды при комнатной температуре [2,3]. Соответственно, такие длительные времена спиновой когерентности состояний NV-центра, за которые возможно обнаружить и контролировать слабые магнитные поля как собственного ядра 14N(15N)), так и близких к NV-центру ядерных 13C спинов, открывает путь к реализации многокубитовых квантовых регистров. При видимом освещении (обычно 532 нм) NV-центр излучает ФЛ в своей фононной боковой полосе 650-750 нм (PSB), интенсивность которой зависит от спиновой проекции основного состояния. Спин-зависимая ФЛ возникает благодаря электрон-фононным спин-орбитальным взаимодействиям, которые связывают возбужденное ^3E и основное $^3A_2$ триплетные $S=1$ состояния с соответствующими $^1A_1$ и ^1E синглетными $S=0$ состояниями, и которые, соответственно, реализуют верхнюю и нижнюю ветви спин-отборочного межсистемного пересечения (*Intersystem crossing – ISC*) (*рисунок 1*) [3,4,5]. Спиновые уровни $m_s=0$ и $m_s=\pm1$ триплетного $S=1$ возбужденного состояния ^3E могут претерпевать радиационные переходы обратно в основное триплетное $S=1$ состояние $^3A_2$ с сохранением спина или безызлучательно с нарушением спина переходить в метастабильное синглетное $S=0$ состояние $|^1A_1>$ с последующим быстрым инфракрасным излучением в синглетное состояние $|^1E>$. В оптическом цикле спиновой поляризации играют роль оба синглетных состояния (*рисунок 1*).

В верхней ветви спин-селективное межсистемное пересечение (ISC) происходит между триплетом ^3E и синглетом $^1A_1$, обусловленное фонон-опосредованным спин-орбитальным взаимодействием. Однако процесс *ISC* в нижней ветви, между ^1E и $^3A_2$, представляет теоретический интерес в связи с тем, что рассматривая состояния в рамках *e*-орбиталей [3,4,5], теория групп не допускает *ISC* между синглетом^1E и триплетом $^3A_2$. Пути решения этого обстоятельства связаны с тем, что природа $|^1E>$ включает в себя значительную электрон-фононную связь с $|A1>$ и электрон-электронное взаимодействие H_{ee} с $|^1E>$ состоянием [4].

Механизм указанной связи можно описать в рамках псевдо-Яна-Теллеровского взаимодействия H_{PJT}, которое и способствует замыканию оптической петли спин-поляризации NV-центра

(*рисунок 1*). Динамичное Ян-Теллеровское взаимодействие H_{DJT} может объяснить наблюдаемую скорость *ISC* в сторону состояний $m_S=\pm 1$ основного состояния $3A_2$. Измеренное время жизни состояния *1E* составляет $T_E=371\pm6$ нс при криогенных температурах, и *ISC* в направлении $m_s=03A_2$ (Γ_z-пунктирная стрелка на *рисунке 1*) должен быть эффективным для наблюдения спиновой поляризации в NV-центре.

Измеренное значение T_E зависит от температуры и уменьшается до 165 нс при комнатной температуре [4]. С помощью спин-контроля и импульсного оптического возбуждения NV-центра спин-зависящие *ISC*-скорости *1E* были извлечены при комнатной температуре [7]. Общий вывод – скорости *ISC* от *1E* до $m_s=0$ и $m_s=\pm1$ (стрелки $\Gamma_\pm$ и $\Gamma_\mp$, на *рисунке 1*, соответственно) сопоставимы [4,5]. Поскольку *ISC* является преимущественно спин-селективным в верхней ветви, этот вывод не противоречит измеренным >90% оптической спиновой поляризации в основном триплетном состоянии. Из современных экспериментальных данных можно заключить, что *1E* связан с $m_s=\pm1$ в состоянии $3A_2$ с помощью переходов с переворотом спина и с $m_s=0$ со скоростью Γ_z, где $T_E^{-1}=\Gamma_z+\Gamma_\pm+\Gamma_{-+}=2{,}70$ МГц при криогенных температурах[4]. Для достижения более глубокого понимания ISC при комнатной температуре можно рассмотреть скорости радиационных и нерадиационных распадов возбужденного уровня (*рисунок 2*).

Полная скорость распада возбужденного уровня с проекцией спина $|i>$ дается суммой этих двух скоростей, а именно $\gamma_i=\gamma^r+\gamma_i^{nr}$. Скорость излучения γ^r, по существу, не зависит от спина, тогда как безызлучательные скорости γ_i^{nr}, сильно зависят от проекции спина (ISC)[6]. Недавние исследования пришли к выводу, что $\gamma_{\pm1}^{nr}\approx10\gamma_0^{nr}$ [6]. Это различие вызывает кратковременный отклик на облучение, которое кардинально различается в зависимости от первоначальной проекции спина основного состояния. Предполагая, что NV- центр освещается оптическим возбуждением со скоростью аналогичной γ^r, изначальная спиновая популяция в $m_s=\pm1$ откладывается в синглетный сектор в течение нескольких оптических циклов триплетных состояний, в то время как популяция в $m_s=0$ продолжается с циклами и порождает ФЛ. Эта зависящая от спина контрастность ФЛ – суть традиционного считывания. Однако контраст недолговечен; он исчезает примерно через 300 нс, по крайней мере, до того, как синглетная популяция возвращается в триплетное основное состояние, и система переходит в стационарное состояние (*рисунок 3*).

Состояние с оптической накачкой обычно служит для последующих квантовых экспериментов инициализированным состоянием $|0>$, а одно из состояний $m_s=\pm1$ – состоянием $|1>$. Типичный спиновый контраст достигает $C=30\%$, а конфокальная установка с непрерывным волновым освещением 532 нм и при использовании насыщенной скорости счета 50 kCts/s в среднем собирает $\alpha_0=0{,}015$ фотонов.

Это обсуждение касается однократного считывания индивидуальных кубитов. Во многих

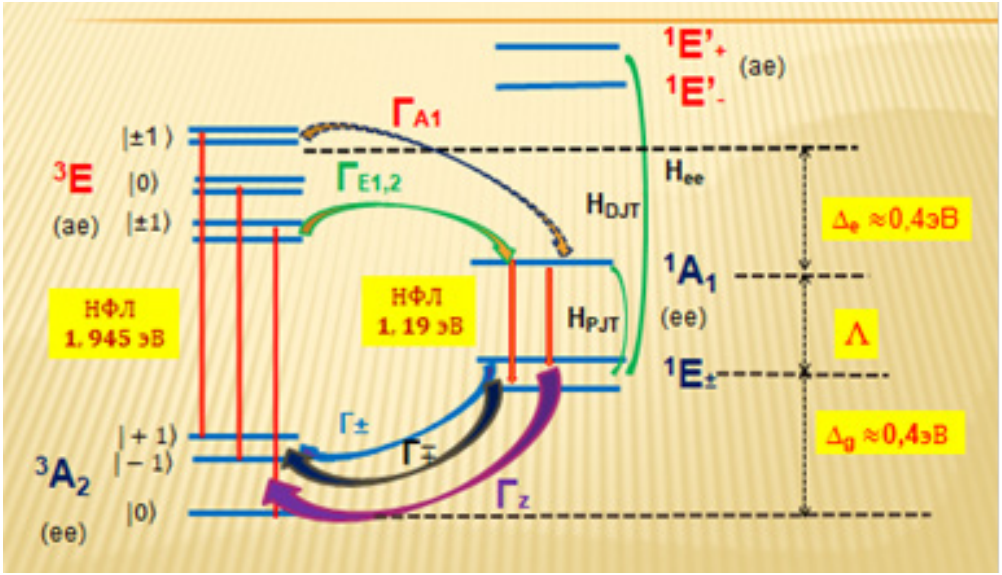


Рис. 1. Изображены многоэлектронные триплетные *S*=1 и синглетные *S*=0 спиновые уровни с двумя бесфононными линиями НФЛ=1,945 эВ и НФЛ=1,19 эВ. Радиационные переходы показаны сплошными красными стрелками. Помечены возможные скорости межсистемного пересечения (Γ_{ISC}) цветными кривыми стрелками, которые участвуют в реализации замкнутости цикла спиновой поляризации. Изогнутые зеленые стрелки отображают дополнительную динамику межсистемного пересечения, которые опосредуются фононами и спин-орбитальным взаимодействием [4]

случаях требуются повторные измерения. Это особенно насущно, когда отношение сигнала к шуму *SNR* одиночного импульса значительно ниже единицы. Предполагая независимые испытания, формулировка *SNR* предоставляет выражение для вычисления усредненного по времени *SNR* в виде

$$\langle SNR \rangle = \sqrt{N} \times SNR ,$$

где N – число измерений.

Использование приведенных определений дает в результате соответствующее одноразовое отношение сигнал/шум порядка ~0,03, что указывает на необходимость более 10^5 повторений для достижения $<SNR>=10$. Каждая точка в цикле измерении может состоять из $4x10^5$ повторов [6]. Во многих приложениях такое усреднение накладывает серьезные ограничения на эффективность. В связи с этим во многих экспериментах реализуются всякие технологические возможности для улучшения эффективности сбора фотонов; твердотельная иммерсионная линза, волноводы, полости, резонаторы и т.д.

3. Спин-электронный спектр при криогенных температурах и резонансное считывание

Хорошо известно [7-12], что спин-триплетное возбужденное состояние NV-центра является орбитальным дублетом. Однако, реально уже при температурах ($T>20-40K$) быстрые орбитальные переходы с участием фононов затемняют тонкую структуру, приводя к эффективному орбитально-синглет-возбужденному состоянию, описываемому Гамильтонианом при комнатной температуре (*рисунок 2*) [11]. Метод подготовки и считывания, основан на резонансном возбуждении спин-селективных оптических переходов NV-центра, которые могут быть спектрально разрешены при низких температуры (*рисунок 4*) [7-10]. В частности, можно использовать переходы E_x и A_1 (см. *рисунок 2*), в которых A_1 соединяет состояние с проекцией спина $m_s = \pm 1$ основного уровня с возбужденным состоянием $m_s=\pm 1$, тогда как E_x соединяет состояния с $m_s=0$. Типичный спектр NV-центра изображен на *рисунок 4*, причем детали расположения пиков могут зависеть от образца. При резонансном возбуждении одиночного перехода флуоресценция со временем затухает из-за небольшого перемешивания спинов внутри возбужденных состояний, которое вызывает переход в другое спиновое состояние. Этот механизм оптической накачки позволяет достичь высокой точности инициализации спинового состояния, например, в работе [7] ошибка подготовки $m_s=0$ в основном состоянии оценивается 0,3±0,1%, что является значительным уменьшением 11%-й ошибки приготовления, наблюдаемой при обычной инициализации [6].

Спин-зависимое резонансное возбуждение также допускает однократное электронное считывание, так наличие или отсутствие флуоресценции при переходе E_x выявляет спиновое состояние. При условиях низких температур (T=4-10 К) напряжения в кристалле алмаза становятся настолько оптимизированными, что интенсивности спин-смешивания и фонон-ин-

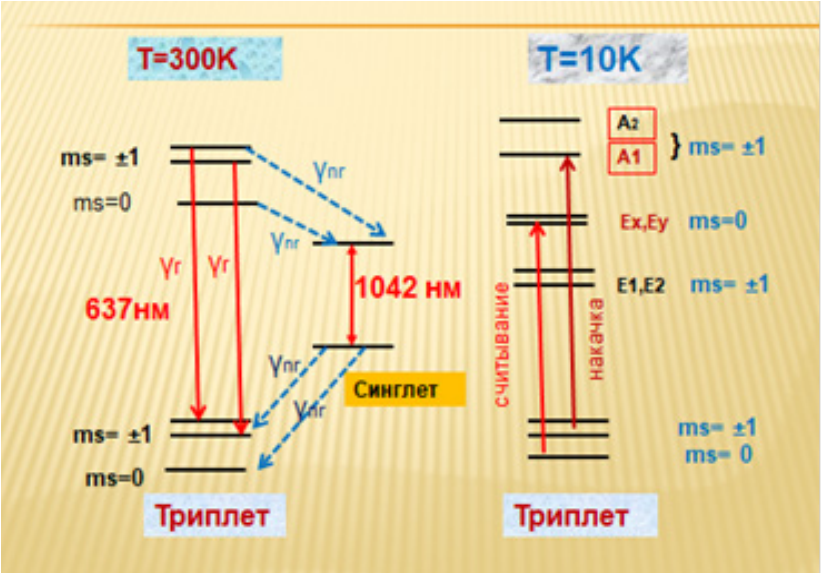


Рис. 2. Электронная структура NV-центра при комнатной температуре (слева). Сплошными линиями обозначены радиационные переходы со скоростями γ_r, а пунктирными линиями – безызлучательные межсистемные переходы *ISC* со скоростями γ_{nr}. Низкотемпературная электронная структура триплетного многообразия азот-вакансионного NV-центра (справа). Указаны отдельные переходы, используемые для спиновой накачки и резонансного считывания

дуцированных переходов внутри возбужденных состояний, увеличивая тем самым время спиновой релаксации состояние E_x к нескольким микросекундам (*рисунок 5*). Добиваясь высокой эффективности сбора фотонов, этот переход при высокой степени сохранения спина позволяет детектировать несколько фотонов до переворота спина [7].

Демонстрация однократного считывания осуществляется путем инициализации электронного спина в $m_s=0$ или $m_s=1$, с последующим резонансным возбуждением E_x – считывающего перехода с временным интервалом t_{ro}~100 μs. При оптимальном выборе длительности интервала ~40 μs, средняя точность достигается значительного уровня:

$<F>=1/2(F(m_s=0)+F(m_s=\pm1))=93,2\pm0,5\%$,

где $F(m_s)$ – это вероятность получения результата измерения m_s после оптической накачки в m_s, при этом детектированию одного или нескольких фотонов присваивается состояние $m_s=0$, иначе $m_s=\pm1$.

Резюмируя, можно определить однократное считывание спина электрона как оптическое спин- разрешающее возбуждение, позволяющее считывать электронный спин за один «выстрел». Наличие или отсутствие флуоресценции при возбуждении циклического перехода (выбирается E_x или E_y) выявляет спиновое состояние (*рисунок 5*).

В низко-напряженных NV-центрах смешивание спинов и фононно-индуцированные переходы значительно подавляются при низких температурах (T<10 K) , что позволяет, при условии достаточно высокой эффективности сбора оптической системой и эффективном подавлении отраженного лазерного света, детектирование нескольких излучаемых фотонов до поворота спина. После подготовки спина либо в $m_s=0$, либо в $m_s=\pm1$ с помощью оптической спиновой накачки, применяется считывающий лазерный импульс. В то время, как для случая приготовленного состояния $m_s=\pm1$, фотоны за определенное время считывающего импульса практически не регистрируются, в состоянии $m_s=0$ обычно детектируется несколько фотонов. Фактически можно принять как определение: состояние $m_s=\pm1$ приписывается к тем событиям, в которых фотоны не были детектированы, и состояние $m_s=0$ – в случае детектирования хотя бы одного фотона (*рисунок 5*).

Перевороты спина в цикле возбуждения приводят к почти экспоненциальному затуханию флуоресценции с переворотом спина $1/\gamma_0=8,1\pm0,1$ μs (0.39±0,01 μs) для E_x (A_1) и начальной интенсивностью 740±5(95±2) тысяч импульсов в секунду, что дает нижний предел точности подготовки $m_s=0$ и $m_s=1$, равный 99,7±0,1% и 99,2±0,1%, соответственно [7]. Из двух последовательных временных интервалов, независимо от начального состояния спина, наблюдается постоянная высокая вероятность получения $m_s=0$ во втором считывании. Это показывает, что метод считывания является проективным и хорошо подходит для применения в количественных измерениях, основанных на квантовых протоколах, базирующихся на измерениях [13,14].

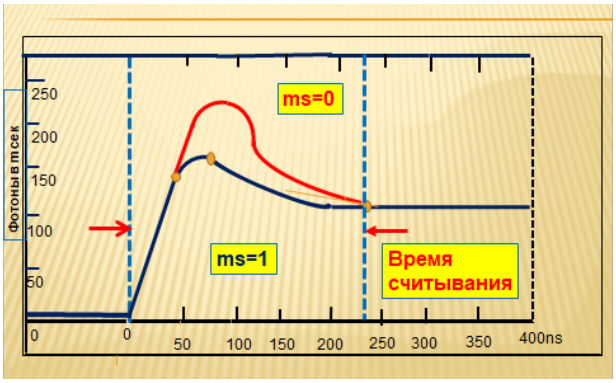


Рис. 3. Скоротечный отклик флуоресценции в $m_s=0$ и $m_s=1$ при 532 нм лазерном облучении. Вертикальные синие прерывистые линии ограничивают оптимальный временной интервал для считывания. Кратковременная флюоресценция при комнатной температуре возникает, как отклик спиновых состояний $m_s=0,\pm1$ при облучении 532 нм. Оптимальная продолжительность подсчета обозначена пунктирными вертикальными линиями

4. Считывание ядерного спина и запутывание ядерных спиновых кубитов измерением

Электронный спин NV-центра может взаимодействовать с близлежащими ядерными спинами. Такие возможности включают собственный ядерный спин азота NV-центра со спином $I=1$ или 1/2 для изотопов 14N и 15N, соответственно, и изотоп углерода 13C со спином

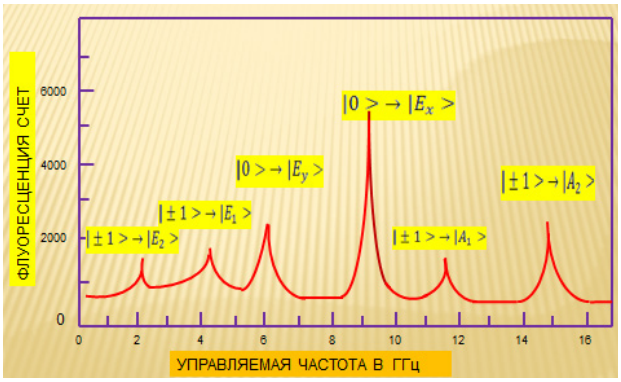


Рис. 4. Резонансное возбуждение и подготовка электрон-спинового состояния NV-центра. Спектр возбуждения фотолюминесценции NV-центра, частота дана относительно 470,443 ТГц

I=1/2. Ядра 13C, благодаря 1,1% содержанию в алмазе, обычно присутствуют на случайных позициях, приближенных к центру NV. С учетом сильно связанного с электронным спином ядерного спина углерода, спин-электрон-ядерный гамильтониан для основного орбитального состояния NV-центра в секулярном приближении можно представить в следующем виде [15-20]

$$H = DS_z^2 + \gamma_e S_z B_z - QI_{N_z}^2 + \gamma_N I_{N_z} B_z - A_N S_Z I_{N_z} + \gamma_C \vec{I}_C \vec{B} + A_C S_z I_{C_z}$$

Для малых магнитных полей ось z-квантования спина углерода в состоянии $m_s=\pm1$ определяется сверхтонким полем электрона в узле решетки ядра 13C. В отличие от спина $I=1$ азота (14N), спин $I=1/2$ изотопа углерода 13C не имеет заранее предопределенной формы квантования $m_s=0$ – его ось квантования в общем случае определяется выравниванием внешнего магнитного поля. Расщепление базовых состояний 13C-кубита, $m_I=+1/2=|0>_C$ и $m_I=-1/2=|1>_C$ зависит от величины сверхтонкого взаимодействия и может составлять от десятков кГц для ядер, находящихся на расстоянии нескольких сайтов, и до более 100 МГц – для соседних сайтов с вакансией. Электронное состояние $m_s=0$ отделено от уровней $m_s=\pm1$ «нулевым полем» $D=2\pi\times2{,}878$ ГГц (при низкой температуре). При наличии внешнего магнитного поля уровни $m_s=\pm1$ расщепляются на $2\gamma_e B_z$,где B_z z-компонента поля, а $\gamma_e=2\pi\times2{,}802$ МГц/G – гиромагнитное отношение электронов. Квадрупольное расщепление с $Q=2\pi\times4{,}946$ МГц понижает состояние $m_I=\pm1$ ($I=1$ для 14N) относительно уровня $m_I=0$.

Уровень сверхтонкого расщепления, вызванного взаимодействием между электронным спином и спином 14N, определяется константой связи $A_N=2\pi\times2{,}186$ МГц [3,4,5]. При наличии сильно связанного ядерного спина 13C ($I=1/2$) дальнейшее расщепление уровней $m_s=\pm1$ обуславливается величиной константы связи A_C, которая зависит от местоположения ядра 13C.

Квантовое измерение не только извлекает информацию из системы, но и изменяет ее состояние: система проецируется в собственное состояние оператора измерения. Такие проективные измерения могут использоваться для контроля и запутывания кубитов [13,14]. Для двух кубитов базис соответствующего Гильбертового пространства H можно выбрать в виде {|00>,|11>,|01>,|10>}, где символы 0 и 1обозначают две возможные спиновые поляризации кубитов $m_{si}=\pm1/2$ вдоль оси квантования z. В соответствие с выбранным базисом можно ввести четное и нечетное Гильбертовы подпространства H_e(|00>,|11>) и H_g(|01>,|10>), которые можно рассматривать как собственные подпространства оператора четности $P=(\sigma_z,\sigma_z)$, где σ_z означает матрицу Паули с собственными значениями один и минус один. Для двух кубитов измерение четности проектирует кубиты в подпространство, в котором кубиты имеют либо одинаковое значение (четная четность), либо в подпространство, в котором они имеют противоположные значения (нечетная четность). Так все 4 состояния Бела $\psi^{\pm}=(1/2)^{1/2}(|\uparrow\uparrow>\pm|\downarrow\downarrow>)$, $\psi^{\pm}=(1/2)^{1/2}(|01>\pm|10>)$ являются собственными векторами оператора четности $P\psi^{\pm}=\psi^{\pm}$, $P\psi^{\pm}=-\psi^{\pm}$.

Для реализации такого измерения четности требуется использование вспомогательного спин-электронного кубита 3(*рисунок 6*).

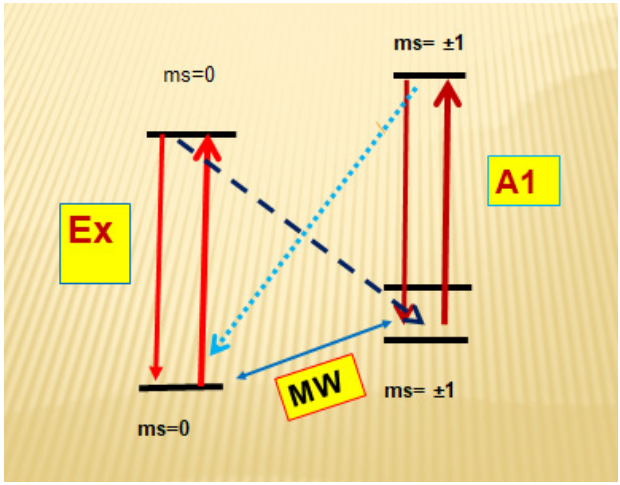


Рис. 5. Представлены энергетические уровни, используемые для подготовки и считывания электронного спина NV-центра (S = 1) в основном и оптически возбужденном состояниях. Переходы помечены в соответствии с симметрией их возбужденного состояния. Пунктирными линиями показаны переходы без сохранения спина.

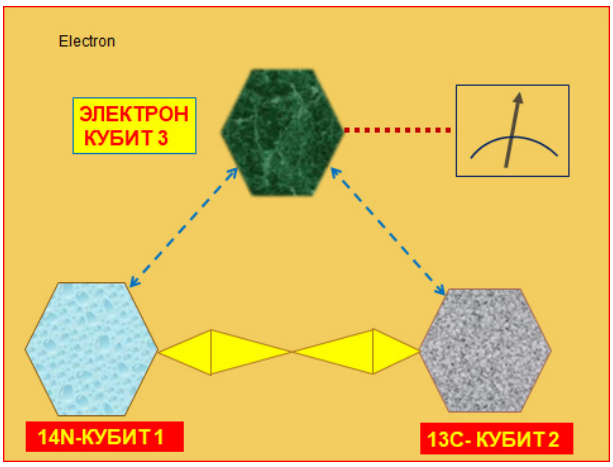


Рис.6. Схематическое изображение запутывания путем измерения. Спины собственного ядра азота14N и близкого к NV-центру ядра изотопа углерода 13C образуют, соответственно, кубиты 1 и 2 , которые связаны с электронным спином NV-центра, использующийся как вспомогательный кубит 3 [14]

Взаимодействие обоих кубитов со вспомогательной системой 3 совершается таким образом, чтобы возникли корреляции ее состояния с четностью объединенного двух кубитового состояния. В этом случае, считывание вспомогательного кубита 3 может спроецировать два кубита в подпространство четной или нечетной четности. Для специально выбранных начальных состояний измерение четности может проектировать кубиты в запутанное состояние. Объявленное измерение кубитовой четности на двух ядерных спинах в алмазе было достигнуто с помощью вспомогательного спин-электронного NV-центра, использованного как считывающую систему. Затем измерение четности используется для проецирования двух спинов в любое выбранное состояние Белла с последующей проверкой результата анализом корреляционных измерений и томографией квантового состояния, которые могут проиллюстрировать запутанность, основанную на измерениях [13,14].

В эксперименте [13]в качестве кубитов были использованы ядерный спин азота N (14N, $I=1$, $|0>=|m_I=0>$,$|1>=|m_I=+1>$), связанный с NV-центром, и спин, близлежащего ядра углерода C(13C,$I=1/2$,$|0>=|m_I=+1/2>$,$|1>=|m_I=-1/2>$) (*рисунок 7*). Низкие температуры (T<10 K) позволяют выполнить эффективную инициализацию и проективное однократное считывание вспомогательного спин-электронного кубита ($S_e=1$) (кубит3) с помощью резонансного оптического возбуждения. Поскольку электронный спин через сверхтонкое взаимодействие связан с кубитами ядерного спина, ядерные спины могут быть инициализированы и считаны путем отображения их состояний на спин электрона. Спин-ядерными кубитами можно индивидуально управлять с высокой точностью до десятков микросекунд с помощью радиочастотных импульсов, и, если они хорошо изолированы от окружающей среды, время дефазировки T_2^* превышает миллисекунду для обоих кубитов. Прямое взаимодействие между кубитами меньше чем T_2^* (сила взаимодействия между спинами ядер оценивается, как (30±13) Hz) и пренебрежимо мало в сравнении с временным масштабом эксперимента ~100μs.

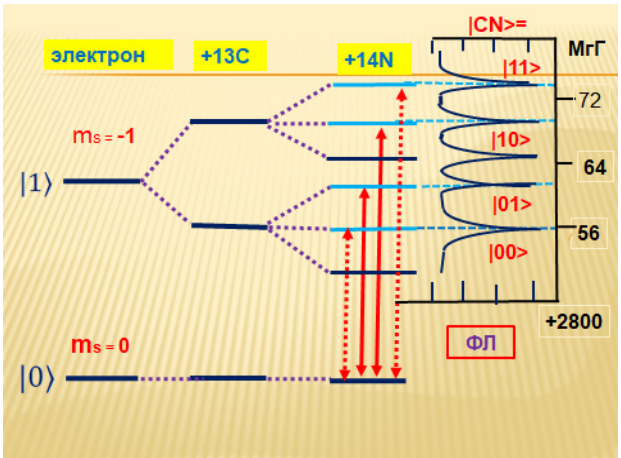


Рис. 7. Спектр энергетических уровней для электронного спинового перехода $m_s=0 \rightarrow m_s=-1$.Данные показывают фотолюминесценцию (ФЛ) по отношению к частоте облучаемых микроволн (МВ). Спин-электронный уровень $|1>=ms=-1$, благодаря сверхтонким взаимодействиям со спином ядра 13C , равным $I_C=1/2$ (сверхтонкая константа 12,796 МГц) и со спином 14N, равным $I_N=1$ (сверхтонкая постоянная 2,184 МГц), расщепляется на $(2I_C+1)\times(2I_N+1)=6$ хорошо разрешенных резонансов. Вертикальные стрелки указывают на переходы между электронными переходами $m_s=0$ и $m_s=-1$ для четырех различных двух кубитовых состояний (пунктирные для четных состояний)

Реализация измерения четности изображена на принципиальной схеме (*рисунок 6* [14]). Сначала вспомогательный кубит 3 инициализируется в состояние |1>. Затем применяются две операции CNOT к вспомогательному кубиту, которые контролируются двумя кубитами 1 и 2 (вентилями Тофолли) с помощью специально подобранных микроволновых импульсов на электронных переходах для ядерных спиновых состояний $|\psi>_{CN}=|00>$ и $|\psi>_{CN}=|11>$. В результате на вспомогательном кубите 3 устанавливается |0>, если кубиты находятся в состоянии четной четности, т.е. если оба кубита имеют значение 0 (первый вентиль) или если оба имеют значение 1 (второй вентиль). Эта операция устанавливает коррелирование между вспомогательным кубитом и четностью двухкубитового состояния. Наконец, совершается считывание спинового состояния вспомогательного кубита 3, которое проецирует кубиты в подпространство четной или нечетной четности (*рисунок 8А*).

Измерение четности идеально подходит для генерации запутанных состояний высокой точности, которая объявляется результатом измерения.

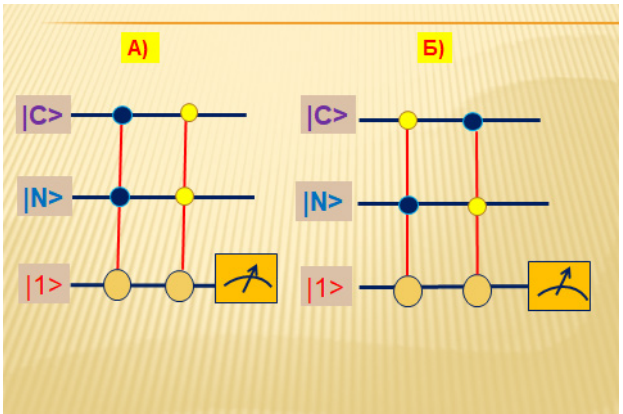


Рис. 8. Схема Тоффоли измерения четной А) и нечетной Б) четностей

Для этого следует применить измерение четности для проецирования двух спин-ядерных кубитов в состояние Белла. Сначала кубиты инициализируются путем проективного измерения в $|00>$, а вспомогательный кубит 3 устанавливается в состоянии $|1>$ так, чтобы его можно было использовать при последующем измерении четности и окончательном считывании. Затем, применением π/2-импульса к каждому из кубитов, создается максимальная суперпозиция состояний двух кубитов $|\psi>_{CN>}=(|00>+|01>+|10>+|11>)/2$. Дальнейшее измерение четности проецирует ядерные спины в четное подпространство в состояние Белла $|\psi+>=(|00>+|11>)(1/2)^{1/2}$ с идеальной точностью $F<\psi+|\rho|\psi+>=(90\pm3)\%$, где ρ – измеренная матрица плотности [13]. Измерением четности также можно проецировать кубиты в другие состояния Белла, так можно создать состояния $|\psi^{+}>=(|01>+|10>)(1/2)^{1/2}$ и $|\psi^{-}>=(|01>-|10>)(1/2)^{1/2}$ путем проектирования в нечетное подпространство (*рисунок 8Б*).

В отличие от измерений классической четности, измерение квантовой четности может дать информацию только о четности всей системы без какой-либо дополнительной информации об отдельных состояниях кубита.

Следовательно, когерентности внутри подпространства четности, в которое спроектирована система, остаются неизменными. Благодаря этому уникальные измерения квантовой четности лежат в основе многих протоколов квантовой информации, например, для генерации запутанных состояний или даже для проверки основ квантовой механики. Сохранение когерентности внутри подпространства четности после измерения четности имеет решающее значение в дальнейших протоколах измерений многокубитовой четности. Расширяя измерения двух кубитовой четности, измерения трех кубитовой четности позволили создать максимально запутанное трех кубитовое состояние $GHZ{:}\psi=(1/2)^{1/2}(|000>+|111>)$, для достижения которого четность измерения включала следующие три операции

$p_1=\sigma_{x,1}\otimes\sigma_{y,2}\otimes\sigma_{y,3}; p2=\sigma_{y,1}\otimes\sigma_{x,2}\otimes\sigma_{y,3}; p_3=\sigma_{y,1}\otimes\sigma_{y,2}\otimes\sigma_{x,3}$

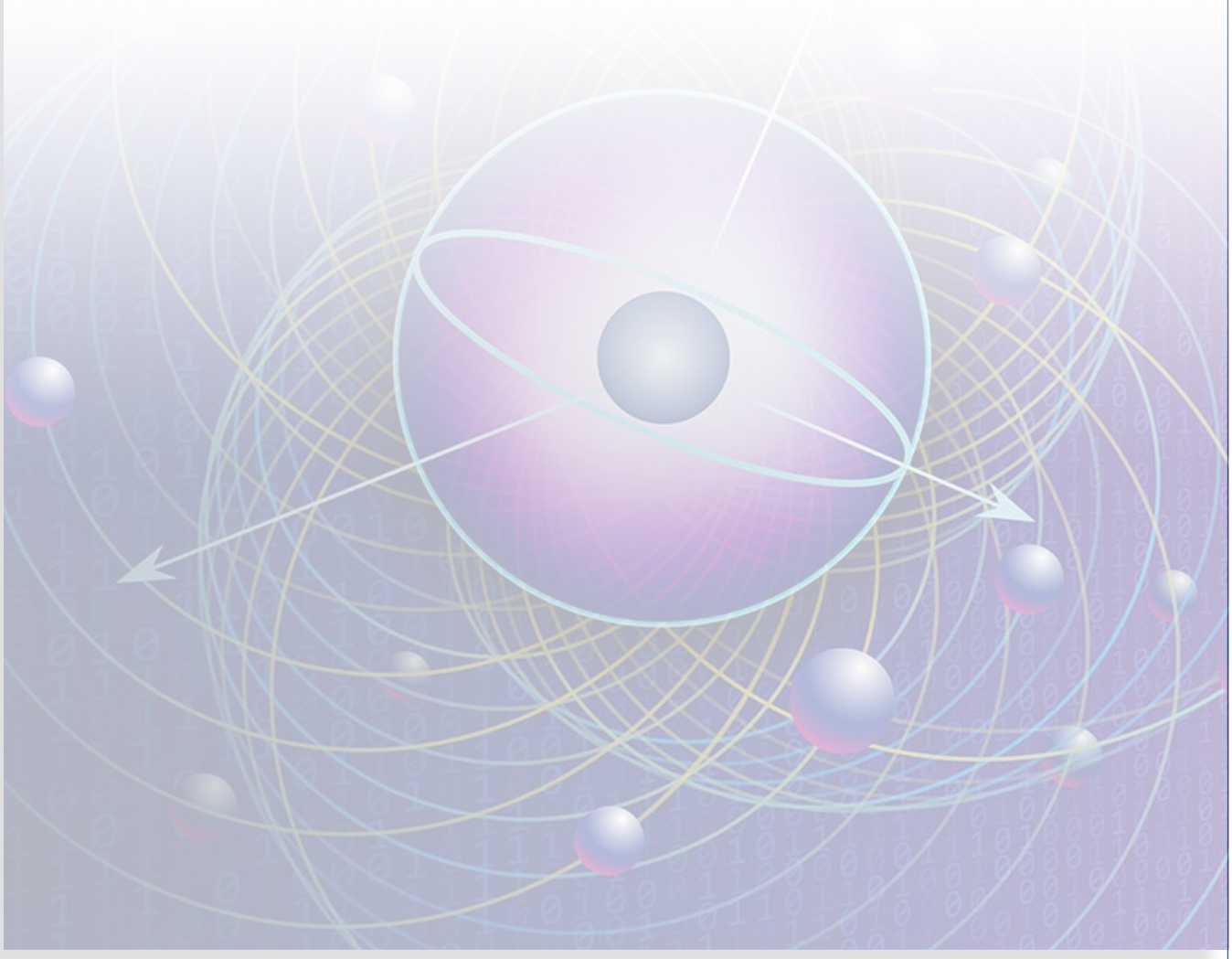
где $\sigma_{x,i}$ и $\sigma_{y,i}$ – x- и y-матрицы Паули на i-й кубит [21].

Эти измерения идеально проецируют любое входное состояние трех ядерных спинов на один из восьми GHZ-состояний: $(1/2)^{1/2}(|000>\pm|111>)$, $(1/2)^{1/2}(|001>\pm|110>)$, $(1/2)^{1/2}(|010>\pm|101>)$, $(1/2)^{1/2}(|100>\pm|011>)$ в зависимости от результатов измерений.

Литература

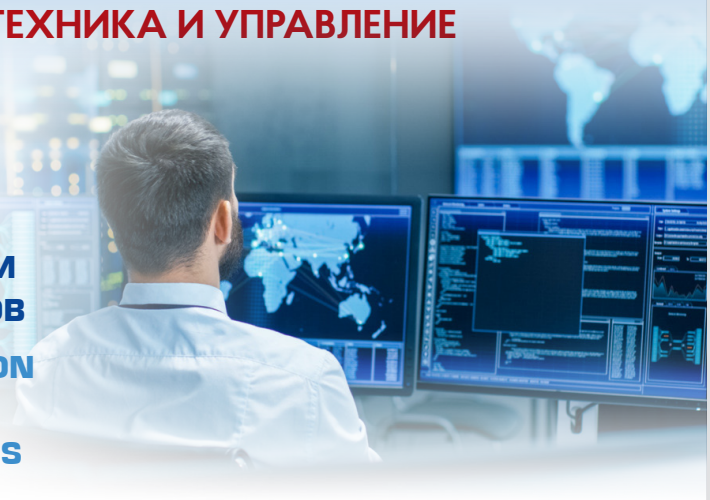
1. A.Gruber, A. Drabenstedt, C. Tietz, L. Fleury, J. Wrachtrup, C. von Borczyskowski, Scanning Confocal Optical Microscopy and Magnetic Resonance on Single Defect Centers. Science, vol.276, Pp.2012-2014(1997).
2. F. Jelezko, T. Gaebel, I. Popa, A. Gruber, J. Wrachtrup. Observation of Coherent Oscillations in a Single Electron Spin. Phys. Rev. Lett., vol.92, 76401(2004).
3. M.W. Doherty, N.B. Manson, P Delaney, L.C.L. Hollenberg The negatively charged nitrogen-vacancy centre in diamond: the electronic solution New J. Phys., vol.13, 025019(2011).
4. G.Thiering, A. Gali1. Theory of the optical spin-polarization loop of the nitrogen-vacancy center in diamond arXiv: 1803.02561v4 [quant-ph] 21 Jun 2018.
5. Á. Gali, Structures *Ab initio* theory of the nitrogen-vacancy center in diamond 2arXiv: 1906.00047v3 [quant-ph] 19 Sep 2019.
6. D.A. Hopper, H.J. Shulevitz, and L. C. Bassett. Spin Readout Techniques of the Nitrogen-Vacancy Center in Diamond.arXiv:1809.05237v2 [quant-ph] 24Sept.(2018).
7. L. Robledo, L. Childress, H. Bernien, B. Hensen, P. Alkemade, R. Hanson. High-fidelity projective readout of a solid-state spin quantum register arXiv: 1301.0392v1 [quant-ph] 3 Jan 2013.
8. P.Tamarat, N. Manson, J. Harrison, R. McMurtrie, A. Nizovtsev, C. Santori, P. Neumann, R. Beausoleil, T. Gaebel, F. Jelezko, P. Hemmer, J. Wrachtrup. Spin-flip and spin-conserving optical transitions of the nitrogen-vacancy centre in diamond. New J. Phys.,vol.10, 45004(2008).
9. P.Neumann, J. Beck, M. Steiner, F. Rempp, H. Fedder, P. Hemmer, J.Wrachtrup, F. Jelezko. Single-Shot Readout of a Single Nuclear Spin. Science, vol.329, Pp.542-544 (2010).
10. A.Batalov,V. Jacques, F.Kaiser, P. Siyushev, P. Neumann, L. Rogers, R. McMurtrie, N. Manson, F. Jelezko, J. Wrachtrup. Low temperature studies of the excited-state structure of negatively charged nitrogen-vacancy color centers in diamond. Phys. Rev. Lett, vol.102, 195506 (2009).
11. G.Fuchs, V. Dobrovitski, D.Toyli,F. Heremans, C.Weis, T.Schenkel, D.Awschalom. Excited-state spin coherence of a single nitrogen-vacancy centre in diamond. Nat. Phys., vol.6, Pp.668-672 (2010).
12. Волков Г.Г., Смуров С.В. Спин-электронные и ядерные кубиты. Квантовое запутывание NV-центров алмаза // Известия Института инженерной физики, 2017. №2(44). С.40-50.
13. 13. W. Pfaff, T. Taminiau, L. Robledo, H. Bernien, M. Markham, D. Twitchen, R. Hanson. Demonstration of entanglement-by-measurement

of solid state qubits Nature Phys. 9, 29-33 (2013), arXiv:1206.2031 [quant-ph] (2013).
14. Bernien H, Hensen B, Pfaff W, Koolstra G, Blok MS, Robledo L, Taminiau TH, Markham M, Twitchen DJ, Childress L, Hanson R. Heralded entanglement between solid-state qubits separated by three metres *Nature* ,vol.497,Pp. 86-90(2013).
15. L. Jiang, J. Hodges, J. Maze, P. Maurer, J. Taylor, D. Cory, P. Hemmer, R. Walsworth, A.Yacoby, A. Zibrov, M.Lukin. Repetitive Readout of a Single Electronic Spin via Quantum Logic with Nuclear-Spin Ancillae. Science, vol.326, Pp.267-272 (2009).
16. M.Widmann, T. Rendler, M. Doherty, T. Babinec, Sen Yang, M. Eyer, P. Siyushev, Birgit J. M. Haussmann, M. Loncar, Z. Bodrog, A. Gali, N. Manson, H. Fedder, J. Wrachtrup. Readout and control of a single nuclear spin with a meta-stable electron spin Ancilla. arXiv:1302.4608v1 [quant-ph] 19 Feb 2013.
17. M. Dutt, L. Childress, L.Jiang, E. Togan, J.Maze, F. Jelezko, A. Zibrov, P. Hemmer, M.Lukin. Quantum Register Based on Individual Electronic and Nuclear Spin Qubits in Diamond. Science,vol. 316, Pp.1312-1316 (2007).
18. L.Childress, M.Dutt, J.Taylor, A. Zibrov, F. Jelezko, J. Wrachtrup, P.Hemmer, M. Lukin. Coherent Dynamics of Coupled Electron and Nuclear Spin Qubits in Diamond. Science, vol.314, Pp.281-285 (2006).
19.A. Reiserer, N. Kalb, M. Blok, K. van Bemmelen, T. Taminiau, R. Hanson, D. Twitchen, M. Markham. Robust quantum-network memory using decoherence-protected subspaces of nuclear spins. Phys. Rev, vol. 6, 021040 (2016).
20. N. Kalb, A. Reiserer,P. Humphreys, J. Bakermans, S. Kamerling, N. Nickerson, S. Benjamin, D.Twitchen, M. Markham, R. Hanson. Entanglement distillation between solid-state quantum network nodes. Science, vol.356 Pp. 928-932 (2017).
21. S.B. van Dam, J. Cramer, T.H. Taminiau, and R. Hanson._Multipartite entanglement generation and contextuality tests using non-destructive three-qubit parity measurements. arXiv: 1902.08842v1 [quant-ph] 23 Feb 2019.



УДК 004.056

СТРУКТУРА СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ИМИТАЦИОННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ



THE STRUCTURE OF THE INFORMATION SECURITY SYSTEM IN THE SIMULATION OF ROBOTIC COMPLEXES

Евгений Валерьевич Умников
ведущий инженер
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов,
Большой ударный пер., д. 1а
Тел. 8 (4967) 35-31-93
E-mail: rtc@iifmail.ru

Дмитрий Владимирович Грачёв
начальник лаборатории
ФГБУ «27 ЦНИИ» МО РФ
Адрес: 125284, Москва,
1-й Хорошевский проезд, д. 5
Тел.: 8 (495) 945-77-80

Аннотация
В статье рассмотрена предполагаемая структура и функционал системы обеспечения информационной безопасности при использовании программных средств имитационного моделирования робототехнических систем в применении к перспективной системе моделирования «виртуальный полигон». Приведены возможные направления и средства обеспечения информационной безопасности в процессе моделирования РТК с помощью виртуального полигона.
Ключевые слова: система защиты информации, несанкционированный доступ, информационная безопасность, программные и аппаратные уязвимости.

Summary
The article considers the proposed structure and functionality of the information security system when using software tools for simulation of robotic systems in application to a promising modeling system "virtual polygon". Possible directions and means of ensuring information security in the process of robotic complex modeling using a virtual polygon are presented.
Keywords: information security system, unauthorized access, information security, software and hardware vulnerabilities.

Система имитационного моделирования робототехнических комплексов «виртуальный полигон» (ВП), как специализированная информационная система, направленная на предоставление сетевого сервиса разработчикам робототехнических комплексов (РТК), должна иметь комплексную систему обеспечения информационной безопасности. Данная система обеспечивает необходимый уровень безопасности как от угроз «извне», так и предотвращает возможное неблагоприятное «внутреннее» воздействие, например от скомпрометированного инсайдером терминала системы, на работу программных средств и аппаратных комплексов, используемых другими участниками моделирования на ВП.

Информационная безопасность, должна обеспечиваться как административными мерами, так и программно-аппаратными средствами с целью непрерывности работы, обеспечения целостности и конфиденциальности всех информационных ресурсов системы ВП. Важным моментом является наблюдение и оценка порядка выполнения системой определенных функций и необычных отклонений от запланированных последовательностей работы.

В структуру системы обеспечения информационной безопасности (ИБ) системы имитационного моделирования РТК должны входить следующие взаимосвязанные подсистемы, схематично изображенные на *рисунке 1*.

Большинство этих подсистем широко известны, подробно описано [1-9] и эффективно используется не первый год в составе существующих систем обеспечения информационной безопасности. Однако специфика задач, стоящих перед системой имитационного моделирования «Виртуальный полигон», процессы, составляющие основу используемых подходов их решения и особенности множественных удаленных под-

ключений сторонних терминалов участников по открытым каналам связи Интернет, вносят существенные коррективы в систему обеспечения ИБ ВП.

В системе обеспечения ИБ виртуального полигона требуется расширить функционал подсистемы мониторинга и аудита событий, добавить подсистему мониторинга и аудита процессов. Программные «агенты», обеспечивающие сбор базовой информации с «событиями безопасности» в системе, должны будут дополнены возможностями непрерывного контроля процессов. При этом, под «процессами» подразумеваются не только загруженные в память компьютеров программные элементы, составляющие систему ВП, но и заданный порядок действий пользователей и программных средств по подготовке, проведению экспериментов и обработке полученной информации системой ВП.

1. Подсистема аутентификации пользователей ВП

Управление правами доступа пользователей, аутентификационной информацией и соответствие автоматизированной системы (АС) ВП всем нормативным документам РФ, реализуется подсистемой аутентификации пользователей ВП.

Она обеспечивает:

- проведение идентификации, а так же аутентификацию пользователей в случае доступа к информационным ресурсам ВП;
- использование различных электронных ключевых носителей, таких как eToken и сертификатов открытых ключей [1];
- механизмы контроля фактов предоставления доступа к программам и справочным данным ВП для пользователей;
- механизмы выдачи и отзыва прав доступа к информационным системам ВП пользователям;
- использование пользователем одного общего ключа для идентификации во всех приложениях ВП;
- сбор статистики времени доступа и использования информационных ресурсов ВП, подготовка плановых отчетов и поддержка проведения аудитов ИБ ВП.

В состав подсистемы входят сервера:

- Удостоверяющий Центр;
- Общий каталог LDAP;
- Сервер идентификации;
- Хранилище пользовательской информации;
- Программное обеспечение доступа;
- eToken и считыватели на терминалах пользователей.

Удостоверяющий Центр обеспечивает:

- управление информацией о ключах и соответствующих цифровых сертификатах;
- функционал шифрования и ЭЦП с использованием цифровых сертификатов (X.509);
- проверку подлинности и актуальности цифрового сертификата пользователя.
- аутентификацию пользователей при доступе к ВП и подключений по VPN.

Сервер LDAP обеспечивает хранение и общий доступ к действующим и отозванным открытым ключам сертификатов.

Сервер идентификации обеспечивает основные задачи по комплексному управлению ключами eToken и смарт-картами:

- создание и управление учётными записями пользователей;
- выдача пользователям USB-ключей eToken и смарт-карт с сертификатами,· обновление и отзыв сертификатов;

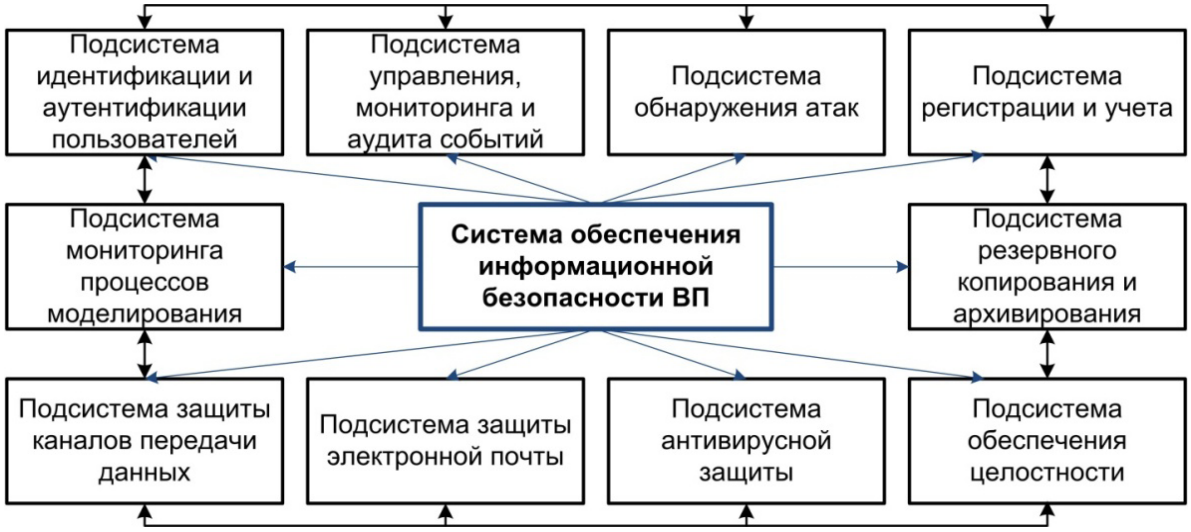


Рис. 1. Возможная структура системы обеспечения ИБ виртуального полигона

● регистрация радио-меток (RFID);

● управление пользовательскими полномочиями.

Сервер хранилища пользовательской информации должен обеспечивать:

● основанное на стандартах LDAP, выделенное масштабируемое хранилище информации о пользователях;

● единая среда проверки прав доступа пользователей ко всем сетевым приложениям ВП;

● единая среда, обеспечивающая управление всем жизненным циклом информации о пользователях;

● синхронизацию паролей между различными приложениями ВП;

● функционал отчетов и аудита политики безопасности;

● интеграцию информации о пользователях с другими системами безопасности ВП.

Программное обеспечение доступа обеспечивает:

● аутентификацию пользователей с помощью ключей eToken или смарт-карт;

● использование устойчивых паролей для доступа в систему ВП;

● использование цифровых сертификатов и закрытых ключей для входа в систему ВП;

● возможность реализации двухфакторной аутентификации пользователя.

2. Подсистема централизованного управления безопасностью и мониторинга событий

Подсистема централизованного управления ИБ, мониторинга и аудита событий, предназначена для непрерывного мониторинга, выявления и своевременной реакции системы на угрозы ИБ для ВП.

В состав подсистемы входят:

● сервер управления и средства мониторинга и аудита событий;

● серверные и терминальные программные сенсоры обнаружения атак.

Средства мониторинга и аудита событий обеспечивают:

● сбор и хранение событий безопасности с программных сенсоров и сетевых устройств (с помощью технологии NetFlow).

Сервер управления подсистемой мониторинга и аудита событий выполняет следующие основные функции:

● управление техническими средствами мониторинга и аудита событий [1];

● хранение и анализ собранных данных о событиях ИБ;

● оперативное информирование о возможных нарушениях безопасности;

● формирование заданных отчётов и выдача рекомендаций для повышения ИБ.

Серверные и терминальные софтовые сенсоры обнаружения атак обеспечивают первичный сбор информации о событиях в сети ВП.

3. Подсистема выявления хакерских атак на ВП

Для обеспечения контроля за нормальным функционированием инфраструктуры системы ВП и срочного реагирования на осуществление вредоносных и вирусных действий, на серверах должна быть внедрена система IDS. Подсистема обнаружения хакерских атак на ВП должна своевременно обнаруживать сетевые хакерские атаки и противодействовать их деструктивным действиям.

В составе подсистемы должны быть:

● сервер управления подсистемой обнаружения атак;

● программные сенсоры обнаружения атак;

● прочее управляемое сетевое оборудование.

Сервер управления подсистемой обнаружения атак выполняет следующие функции:

● управление сенсорами;

● обновление баз данных сигнатур атак;

● сбор данных с сенсоров обнаружения атак;

● централизованное хранение зарегистрированных событий в течении заданного времени.

Сенсоры обнаружения атак предназначены для:

● выявление вредоносной деятельности и распознавание атак на сервера в сети ВП;

● захват и контроль сетевого трафика на основе заданных правил и базы данных сигнатур известных сетевых атак;

Телекоммуникационное оборудование, используя технологию Switch port analyzer (SPAN), настраивается так, что бы перенаправлять необходимый сетевой трафик на сенсор [1].

4. Подсистема регистрации действий пользователей ВП

Для обеспечения внутренней безопасности от несанкционированного доступа, должны регистрироваться все события входа/выхода пользователей системы ВП, регистрация фактов загрузки, конфигурирования, перезапуска и останова значимых программных средств системы ВП. При этом необходимо:

● осуществлять регистрацию фактов печати документов;

● осуществлять регистрацию фактов «старт/стоп» для всех программ и процессов в ВП;

● осуществлять сохранение фактов доступа к защищаемым файлам в системе для всех программ ВП и пользователей;

● осуществлять фиксацию попыток и фактов доступа в ВП к защищаемым аппаратным объектам: -терминалам; -серверам; -каналам VPN; -принтерам, а так же программным и информационным объектам ВП;

● обеспечить учет всех защищаемых носителей информации: маркировкой и занесением основных учетных данных в журнал.

5. Подсистема распределенного мониторинга процессов моделирования

Для организации мониторинга, выявления и своевременного реагирования на угрозы ИБ в процессах системы моделирования, необходима подсистема распределенного мониторинга процессов моделирования на ВП. Специфические условия распределенных процессов проведения имитационного моделирования РТК требуют использования аналогичных распределенных средств мониторинга, для выявления попыток несанкционированного влияния на моделирование и формирование неправильных результатов экспериментов. С целью повышения эффективности работы и снижения издержек, данная подсистема должна функционировать совместно с подсистемой управления информационной безопасностью, централизованного мониторинга и аудита событий, используя заложенные в ней средства оперативного ручного и автоматизированного управления.

Структура подсистемы распределенного мониторинга информационной безопасности виртуального полигона приведена на *рисунке 2*.

В состав подсистемы входят:

● программа (агент) мониторинга терминала моделирования;

● программа (агент) мониторинга серверов моделирования;

● программный комплекс управления подсистемой мониторинга процессов моделирования.

Агент мониторинга процессов моделирования выполняет следующую функцию:

● непрерывная оценка процессов моделирования, сравнение заданных для мониторинга ключевых параметров моделей с эталонными (библиотечными) параметрами, определение возможных отклонений от нормального течения эксперимента и оценка непротиворечивости рабочих и исходно заданных параметров модели РТК.

Агент мониторинга терминала контролирует процессы имитационного моделирования, прямо касающиеся РТК, модель системы управления, специфических каналов связи и ту часть моделируемой обстановки, которые разворачиваются на данном терминале ВП. Эталонные параметры мониторинга, агент мониторинга терминала, загружает перед сеансом моделирования, с учетом заданной сцены ВП и виртуального окружения.

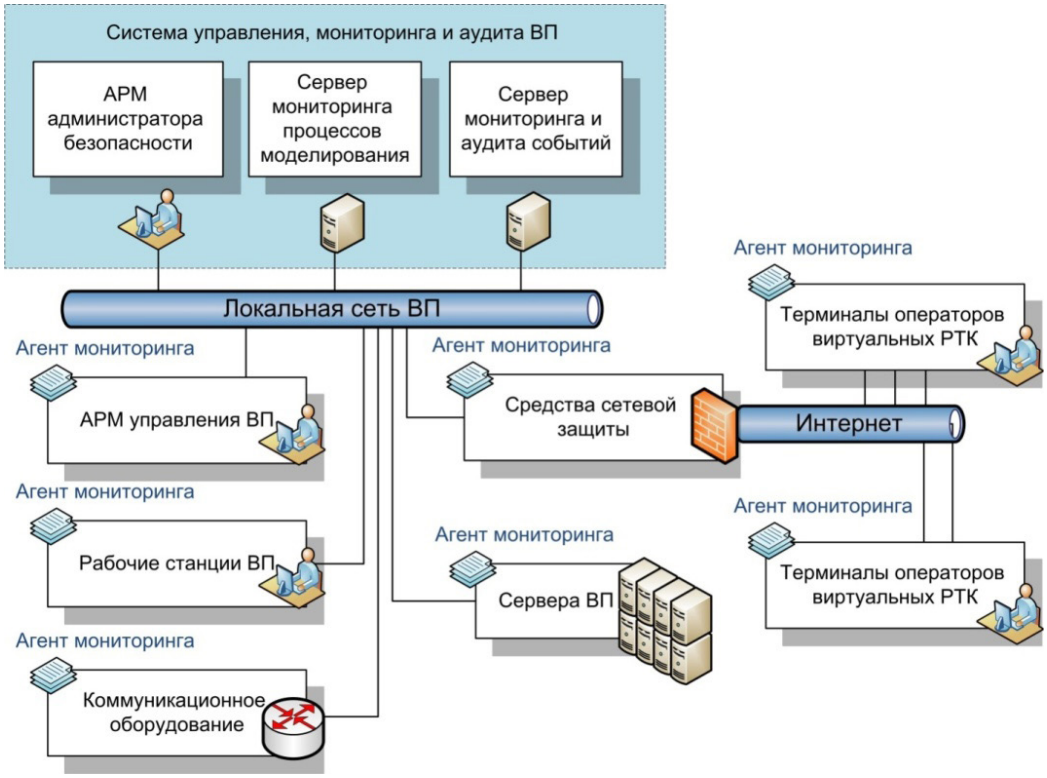


Рис. 2. Структура подсистемы распределенного мониторинга информационной безопасности виртуального полигона

Агент мониторинга сервера контролирует процессы имитационного моделирования, протекающие на данном сервере, включая полную сцену ВП, автоматизируемые модели РТК и прочие виртуальные участники текущего сеанса моделирования, используемые как оппоненты или элементы окружающей обстановки.

Программный комплекс распределенного мониторинга процессов моделирования выполняет следующие функции:

- сбор сведений о противоречиях в параметрах моделей и результатах моделирования (с помощью технологии NetFlow);
- непрерывный контроль потока собранных параметров на критические отклонения;
- интеграцию собранных данных с информацией собранной подсистемой мониторинга и аудита данных о событиях ИБ;
- непрерывная оценка динамики собранных параметров с использованием средств и элементов искусственного интеллекта, выявление новых, потенциально опасных, нарушений ИБ.
- оценка вероятности стороннего воздействия на процесс моделирования ВП;
- оперативное информирование о вмешательстве в процессы моделирования и инцидентах безопасности;
- формирование отчётов с рекомендациями по управлению ИБ.

6. Подсистема защиты каналов VPN в ВП

Для обеспечения защиты информации, передаваемой по открытой сети Интернет между терминалами и системой моделирования, должны быть организованы соединения VPN, шифрующие трафик, что значительно увеличивает безопасность информационного обмена между терминалами и серверами ВП.

В состав подсистемы входят:

- маршрутизаторы, имеющие в своем составе функционал шлюза VPN;
- программы организации канала VPN, на терминалах удалённых пользователей ВП.

Маршрутизаторы VPN выполняют следующие основные задачи:

- поддержку межсетевого взаимодействия с удалёнными узлами сети ВП;
- защиту трафика шифрованием между удалёнными пользователями и внутренними узлами сети;
- защиту и пакетную фильтрацию трафика маршрутизатора;

Программы организации канала VPN выполняют следующие функции:

- шифрование трафика между терминалами удалённых пользователей и шлюзами VPN;
- пакетную фильтрацию входящего и исходящего трафика терминала.

7. Подсистема защиты для электронной почты ВП

Подсистема защиты электронной почты должна обеспечить:

- ограничение несанкционированных подключений к серверу электронной почты, включая фильтрацию трафика;
- должны использоваться существующие механизмы защищенного почтового обмена, обеспечена аутентификация пользователей при отправке почты;
- необходимо вынести в «демилитаризованную зону» сети ВП почтовый сервер.

8. Подсистема ВП для антивирусной защиты

Функционал антивирусной защиты системы ВП должен включать в себя следующие возможности:

- непрерывный мониторинг наличия вирусной активности в системе;
- организация многоуровневой антивирусной защиты с применением антивирусного ПО, построенному по принципам сигнатурного анализа исполняемого программного кода и контроля его специфических действий в системе;
- применение мер изоляции программных процессов серверов и терминалов при построении системы ВП;
- обеспечение специального функционала отдельной антивирусной защиты серверов ВП.

9. Подсистема поддержки целостности ПОВП

Подсистема поддержки целостности ПО системы ВП должна гарантировать отсутствие вредоносных изменений рабочей программной среды, а так же, применяющейся в ней защиты от несанкционированного доступа:

- необходимо обеспечивать непрерывный контроль неизменности программ, составляющих систему ВП;
- должна осуществляться охрана аппаратных средств (сетевых устройств, серверов и носителей информации), допускающая ограничение и доступ в выделенные помещения сотрудников, а так же предотвращение несанкционированного проникновения в помещения АС и хранилище носителей сбэкапленной информации;
- должно проводиться периодическое тестирование средств защиты ИБ с помощью специальных программ. Данные программы должны имитировать попытки несанкционированного доступа к ПО и информации, с целью их изменения.

10. Подсистема резервного копирования и архивирования

Функционал резервного копирования и архивирования информации в системе ВП должен включать в себя возможности:

- должны быть разработаны соответствующие внутренние документы и инструкции, регламентирующие порядок резервного копирования, архивирования и восстановления информации, ориентированные на потребности всего цикла процессов моделирования РТК;
- необходимо обеспечить автоматическое резервное копирование со всех серверов, заданных во внутренних регламентах, на отдельные сетевые хранилища;
- должны быть предусмотрены процедуры проверки и регулярно проводится тестирование резервных копий путем выборочного восстановления;
- необходимо обеспечить безопасность и сохранность созданных резервных копий информации.

Заключение

Широкое использование персональных компьютеров, объединенных в вычислительные сети, позволяет оперативно собирать, передавать/принимать, обрабатывать на серверах большие объемы информации в интересах пользователей, имеющих подключение к внутренней информационной сети через открытую сеть Интернет. Эта тенденция, помимо положительных сторон, дает возможности злоумышленникам несанкционированно считывать закрытую информацию, циркулирующую в системе ВП или нарушить ее нормальную работу.

В данной работе кратко описан состав и назначение подсистем обеспечения ИБ в системе моделирования ВП. Предложен основной состав подсистем и их функционал по обеспечению безопасности, позволяющий снизить риски и приблизиться к решению проблемы обеспечения безопасности ВП, как распределенной сетецентрической информационной системы, использующей открытые каналы связи.

Литература

1. Челухин В.А. Комплексное обеспечение информационной безопасности автоматизированных систем: учеб. пособие. Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», 2014. 207 с.
2. Чипига А.Ф. Информационная безопасность автоматизированных систем. М.: Гелиос АРВ, 2010. 336 с.
3. Ефимова Л.Л., Кочерга С.А. Информационная безопасность. Российский и зарубежный опыт: монография. М.: Юнити, 2015. 239 с.
4. Taulli T. Artificial Intelligence Basics: A Non-Technical Introduction. 2-е изд. Apress, 2019. 200 p.
5. Joseph Muniz, Gary McIntyre, Nadhem AlFardan. Security Operations Center. Building, Operating, and Maintaining your SOC. Cisco Press.448 p.
6. Умников Е.В., Атакищев О.И., Ванюшин В.М., Грачёв В.А. Особенности обеспечения информационной безопасности при моделировании РТК с помощью виртуального полигона // Известия Института инженерной физики, 2021. №1(59). С. 66-72.
7. Корсунский А.С., Маттис А.В., Масленникова Т.Н. О некоторых аспектах защиты информации в беспилотных и роботизированных средствах // Морские информационно-управляющие системы, 2012. №1(19). С. 10-14.
8. Михайлов Ю.Б. Научно-методические основы обеспечения безопасности защищаемых объектов. М.: Горячая линия-Телеком, 2015. 322 с.
9. Винокуров А.В. Обеспечение информационной безопасности комплексов с беспилотными летательными аппаратами как задача противодействия терроризму // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. Научно-производственное объединение специальных материалов. СПб., 2017. С. 66.
10. Коваль Е.Н., Лебедев И.С. Общая модель безопасности робототехнических систем // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2013. №4(86). С. 153-154.
11. Умников Е.В., Грачев В.А., Мурашов А.Г. Концепция многоцелевого виртуального робототехнического полигона // Сборник материалов Одиннадцатой Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления»; Южный федеральный университет. Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2016. Т. 2. С. 125-134.
12. Юсупов Р.М., Пальчун Б.П. Безопасность компьютерной инфосферы систем критических приложений. Вооружение. Политика. Конверсия. М. 1993, №2. С. 52-56, №3. С. 23-31.

УДК 615.2, 615.31

ТАМЕРОН – КАК ПРЕПАРАТ ДЛЯ ПРОФИЛАКТИКИ И ЛЕЧЕНИЯ НЕЙРОПСИХОЛОГИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ СТРЕССА У ВОЕННОСЛУЖАЩИХ

TAMERON – AS A DRUG FOR THE PREVENTION AND TREATMENT OF NEUROPSYCHOLOGICAL CONSEQUENCES OF STRESS IN MILITARY PERSONNEL

Артем Михайлович Ермаков
кандидат биологических наук
заместитель начальника отдела контроля фармацевтической службы качества МОУ «ИИФ»
ведущий научный сотрудник
Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН
Адрес: 1422190, Московская обл., г. Пущино, ул. Институтская, д. 3
Тел. +7 (4967) 73-94-28
E-mail: ao_ermakovy@rambler.ru

Ольга Николаевна Ермакова
кандидат биологических наук
научный сотрудник
Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН
Адрес: 142290, Московская обл., г. Пущино, ул. Институтская, д. 3
Тел. +7 (4967) 73-94-28
E-mail: beoluchi@yandex.ru

Елена Александровна Царькова
генеральный директор
Медицинская клиника «АксиоМед»
Адрес: 142210, Московская область, г. Серпухов, ул 2-я Московская, д. 6, к. 5, помещ. 4А
Тел.: +7 (4967) 12-84-88
E-mail: axiomed@mail.ru

Алексей Николаевич Царьков
заслуженный деятель науки РФ
доктор технических наук, профессор
Президент Института – Председатель Правления Института
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210 Московская обл., г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967) 35-31-93
E-mail: info@iifmail.ru

Аннотация

В статье рассматривается проблема острого и хронического стресса при тяжелых физических и психологических нагрузках у военнослужащих. Показано, что с физиологической и биохимической точки зрения последствия стресса, в виде нарушений работы головного мозга и посттравматических расстройств, связаны с развитием окислительного стресса в нервных клетках головного мозга и нейровоспалительными процессами. В качестве перспективного препарата для профилактики и лечения этих нарушений предлагается использование препарата Тамерон. Активное вещество препарата – аминодигидрофталазиндион натрия способно нормализовать окислительно-восстановительный потенциал в клетках и восстановить баланс про- и противоспалительных цитокинов в нервной ткани головного мозга. Таким образом, применение препарата Тамерон может значительно снизить вероятность развития нейропсихологических последствий стресса.

Ключевые слова: Тамерон (аминодигидрофталазиндион натрия), антиоксиданты, стресс, окислительный стресс, нейровоспаление, посттравматические расстройства.

Summary

The article deals with the problem of acute and chronic stress during severe physical and psychological stress in military personnel. It is shown that from a physiological and biochemical point of view, the consequences of stress, in the form of brain disorders and post-traumatic disorders, are associated with the development of oxidative stress in the nerve cells of the brain and neuroinflammatory processes. As a promising drug for the prevention and treatment of these disorders, the use of the drug Tameron is proposed. The active substance of the drug – sodium aminodihydrophthalazinedione is able to normalize the redox potential in cells and restore the balance of pro - and anti-inflammatory cytokines in the nervous tissue of the brain. Thus, use of the drug Tameron can significantly reduce the likelihood of developing neuropsychological consequences of stress.

Keywords: Tameron (sodium aminodihydrophthalazinedione), antioxidants, stress, oxidative stress, neuroinflammation, post-traumatic disorders.

Физиологический стресс, вызванный значительными длительными физическими и психическими нагрузками у военнослужащих как при несении службы в мирное время, а особенно во время выполнения боевых операций, может приводить к длительным нейрогенным нару-

шениям работы головного мозга и развитию посттравматического стресса [1]. Впоследствии, посттравматический стресс способен перетекать в более тяжелые хронические формы вплоть до психических расстройств [2].

Как показывают многочисленные исследования, биологические последствия стресса в высокой степени ассоциированы с повышенными системными уровнями окислительного стресса и воспаления [3]. Эти факторы ускоряют клеточное старение и нейропрогрессию - патологическое ремоделирование нервных клеток и их связей между собой, которое происходит в течение хронического заболевания [4]. Развитие окислительного стресса и связанного с ним воспаления в нервной ткани при повышенных психических и физических нагрузках у военнослужащих может являться прямой причиной нарушений работы нейронов головного мозга и, следовательно, всех последствий этого процесса – посттравматического синдрома и прочих нейропсихологических расстройств.

Основной причиной окислительного стресса в клетках и тканях является нарушение баланса между концентрацией прооксидантов и антиоксидантов. В этом случае концентрация прооксидантных молекул (например, активных форм кислорода и азота) превышает способность доступных антиоксидантов (например, глутатиона, супероксиддисмутазы и других антиоксидантных ферментов) противодействовать этим высокоактивным и разрушительным молекулам [5]. Во время острого стресса количество антиоксидантов увеличивается в ответ на присутствие прооксидантных молекул, при длительном действии стресс-фактора (переход в хроническую фазу) антиоксидантная система истощается и это приводит к дегенерации клеток и их гибели – апоптозу [5]. Нейроны головного мозга особенно уязвимы при развитии окислительного стресса – из-за высокой метаболической потребности и состава липидов в мембранах клеток, которые очень чувствительных к окислению. Исследования показывают, что окислительный стресс приводит к нарушению гематоэнцефалического барьера, изменению процессов нейрогенеза, росту нейритов, а также изменениям морфологии мозга и структуры нервных связей [6].

Воспаление представляет собой аналогичную клеточную реакцию, которая инициируется повреждением клеток и играет роль во многих распространенных заболеваниях. Основная функция воспаления заключается в уничтожении повреждающих агентов и/или защите поврежденной ткани посредством пролиферации клеток воспаления, таких как нейтрофилы, моноциты и лимфоциты. В месте воспаления эти клетки запускают высвобождение различных ферментов, активных форм кислорода и азота, провоспалительных цитокинов и других химических медиаторов, которые в итоге индуцируют окислительный стресс. Таким образом, окислительный стресс и воспаление возникают одновременно и они взаимосвязаны таким образом, что один процесс может легко вызвать другой и наоборот [7]. Современные исследования показывают, что оба состояния (окислительный стресс – воспаление) могут быть вызваны острым и хроническим психологическим или физиологическим стрессом [8].

Исходя из механизмов развития процессов повреждения нервной ткани окислительным стрессом и воспалением, в настоящее время внедряется применение различных антиоксидантных и/или противовоспалительных соединений для профилактики и лечения стрессовых нейрональных расстройств [9]. В исследованиях на животных и предварительных клинических испытаниях было показано, что использование антиоксидантных препаратов позволяет снизить риск развития болезни Альцгеймера и нейродегенеративных расстройств, нейровоспалительных реакций, которые также ассоциированы с нейровоспалительными процессами и окислительным стрессом [10]. В качестве таких соединений используют L-карнитин, N-ацетилцистеин, восстановленный глютатион, природные полифенолы (например, куркумин). Применение этих препаратов нормализует окислительно-восстановительный потенциал в клетках, улучшает настроение и общее самочувствие при стрессовых ситуациях [11-13].

В качестве перспективного препарата для профилактики и лечения когнитивных и психологических состояний после острых и хронических стрессовых нагрузок и, соответственно, нейровоспалительных процессов, связанных с окислительным стрессом у военнослужащих, можно рассматривать Тамерон. Этот препарат зарегистрирован и производится МОУ «Институт инженерной физики», разрешен к применению в качестве лекарственного средства (рег. №: ЛП-006597) [14,15]. Основа этого препарата – вещество аминодигидрофталазиндион натрия, которое обладает способностью нейтрализовать свободные радикалы в клетках и тканях организма. Это происходит как посредством химического взаимодействия Тамерона с активными формами кислорода, так и посредством активации внутриклеточных механизмов антиоксидантной защиты на уровне генетического аппарата клеток [16,17]. За счет модуляции

окислительно-восстановительного потенциала, Тамерон восстанавливает баланс провоспалительных и противовоспалительных цитокинов, значительно снижая остроту течения воспалительных процессов в тканях и органах организма (вплоть до устранения цитокинового шторма при вирусных заболеваниях) [18,19].

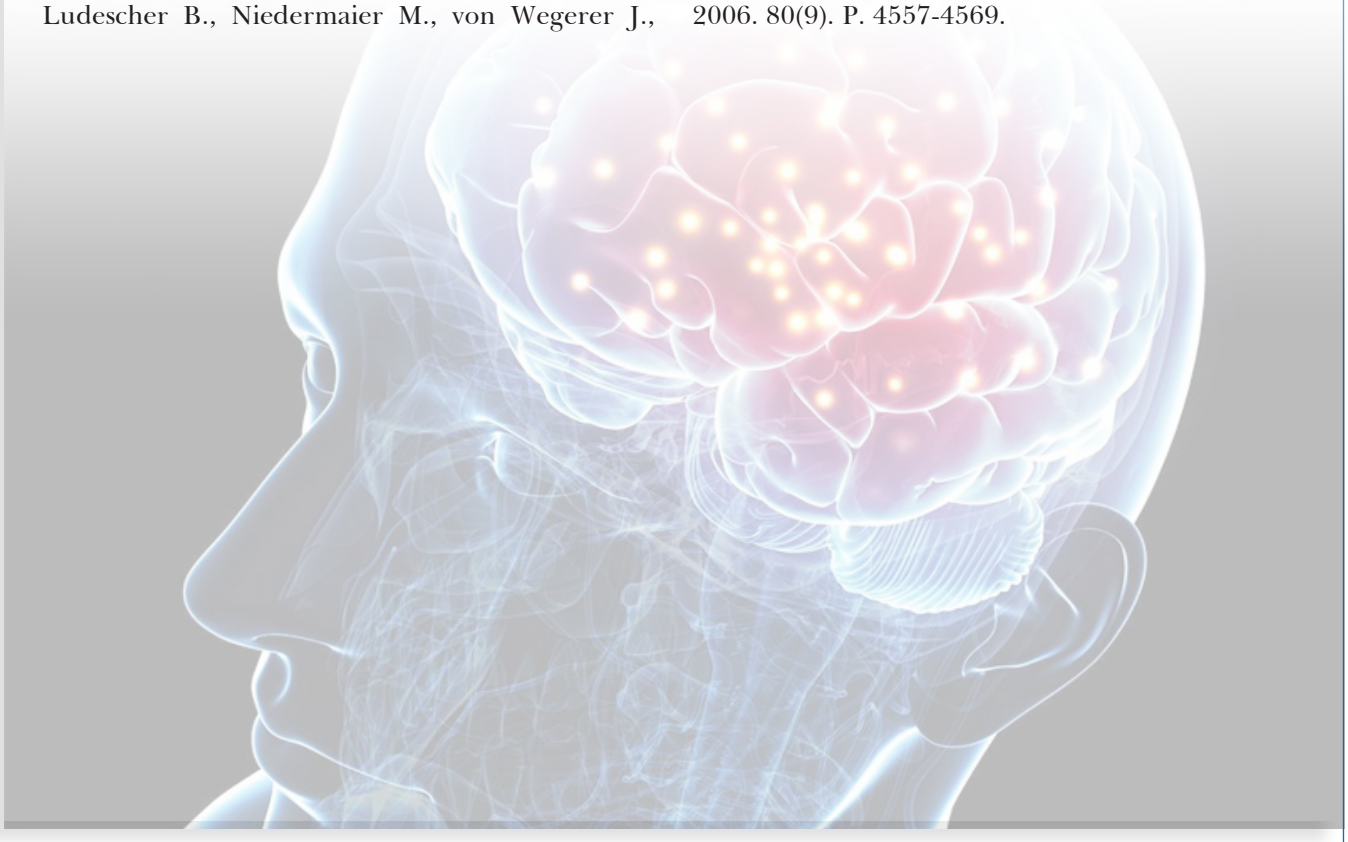
В настоящее время аминодигидрофталазиндион натрия исследуется несколькими фармацевтическими компаниями (Бахфарма (США), Метриофарм (Швейцария)) для лечения заболеваний, связанных с хроническими воспалительными реакциями и окислительным стрессом [20,21]. В частности, Бахфарма рассматривает это вещество как перспективный препарат для профилактики и лечения болезни Паркинсона, а также посттравматического расстройства ветеранов боевых действий – Болезни войны в Персидском заливе. Ранее было показано, что данное заболевание связано с окислительным стрессом, нейровоспалением и системным воспалением, которое сопровождается стойкими когнитивными и поведенческими нарушениями [22,23]. В частности, были проведены исследования воздействия аминодигидрофталазиндиона натрия на течение этого заболевания на примере модели у крыс. Применение препарата восстанавливало окислительно-восстановительные процессы в головном мозге у подопытных животных, а также в циркулирующей крови. Также наблюдалось снижение уровня воспалительных процессов и системного воспаления, улучшение нейрогенеза в головном мозге, когнитивных функций, настроения [24]. На примере других моделей (повреждения нейронов мозга у инфицированных ретровирусом мышей) были получены аналогичные результаты. Применение аминодигидрофталазиндиона натрия существенно снижало уровень окислительного стресса и нейровоспаления в головном мозге, снижало тяжесть течения заболевания [25].

Таким образом, применение препарата Тамерон военнослужащими в качестве профилактического и лекарственного средства будет способствовать нормализации окислительно-восстановительного баланса, и препятствовать развитию воспаления в нервных клетках головного мозга. Нормализация этих процессов будет сопровождаться большей устойчивостью человека к стрессовым факторам, повышению когнитивных функций мозга в стрессовых ситуациях, что особенно актуально при выполнении служебных обязанностей и в условиях боевых операций. Также применение препарата будет полезно при реабилитации и лечении посттравматических расстройств.

Литература

1. Miller M.W., Sadeh N. Traumatic stress, oxidative stress and posttraumatic stress disorder: neurodegeneration and the accelerated-aging hypothesis // Mol Psychiatry, 2014. 9(11). P. 1156-1162.
2. Yaffe K., Vittinghoff E., Lindquist K. et al. Posttraumatic stress disorder and risk of dementia among US veterans // Arch Gen Psychiatry. 2010. 67(6) P. 608-613.
3. Forman H.J., Zhang H. Targeting oxidative stress in disease: promise and limitations of antioxidant therapy // Nat Rev Drug Discov., 2021. 30. P. 1-21.
4. Radi E., Formichi P., Battisti C., Federico A. Apoptosis and oxidative stress in neurodegenerative diseases // J Alzheimers Dis., 2014. 42 Suppl 3. P. 125-152.
5. Sies H. Oxidative stress: a concept in redox biology and medicine // Redox Biol., 2015. №4. P. 180-183.
6. Uttara B., Singh A.V., Zamboni P., Mahajan R.T. Oxidative stress and neurodegenerative diseases: a review of upstream and downstream antioxidant therapeutic options // Curr Neuropharmacol., 2009. 7(1). P. 65-74.
7. Biswas S.K. Does the interdependence between oxidative stress and inflammation explain the antioxidant paradox? // Oxid Med Cell Longev., 2016. P. e569831
8. Miller M.W., Lin A.P., Wolf E.J., Miller D.R. Oxidative Stress, Inflammation, and Neuroprogression in Chronic PTSD // Harv Rev Psychiatry., 2018. 26(2). P. 57-69.
9. Engelhart M.J., Geerlings M.I., Ruitenberg A. et al. Dietary intake of antioxidants and risk of Alzheimer disease // JAMA., 2002. 287(24). P. 3223.
10. Pettegrew J.W., Levine J., McClure R.J. Acetyl-L-carnitine physical-chemical, metabolic, and therapeutic properties: relevance for its mode of action in Alzheimer's disease and geriatric depression // Mol Psychiatry., 2000. 5(6). P. 616–32.
11. Ribas G.S., Vargas C.R., Wajner M. l-carnitine supplementation as a potential antioxidant therapy for inherited neurometabolic disorders // Gene., 2014. 533(2). P. 469-76.
12. Unnithan A.S., Jiang Y., Rumble J.L. et al. N-acetyl cysteine prevents synergistic, severe toxicity from two hits of oxidative stress // Neurosci Lett, 2014. 560. P. 71–6.
13. Monsey M.S., Gerhard D.M., Boyle L.M., Briones M.A., Seligsohn M., Schafe G.E. A diet enriched with curcumin impairs newly acquired and reactivated fear memories // Neuropsychopharmacology., 2015. 40(5). P. 1278-88.
14. ФИПС. Товарные знаки, знаки обслуживания №598830 Российская Федерация. Товар-

ный знак ТАМЕРОН. Заявл. 16.12.2015, опубл. 25.12.2016. Правообладатель: Межрегиональное общественное учреждение «Институт инженерной физики», 142210, Московская обл., г. Серпухов, Большой Ударный пер., 1А (RU).
15. Патент № 2744858 Российская Федерация, СПК C07D237/32 (2020.08); A61K31/502 (2020.08); A61K9/19 (2020.08) Способ получения лиофилизата аминодигидрофталазиндион натрия – лекарственного препарата «Тамерон»: 2020116296: заявл. 28.04.2020 опубл. 16.03.2021. Патентообладатель: Межрегиональное общественное учреждение «Институт инженерной физики» (RU).
16. Ермаков А.М., Царькова Е.А. К вопросу об антиоксидантной активности препарата «Тамерон» // Известия Института инженерной физики, 2020. №3(57). С.103-106.
17. Qiang W., Cahill J.M., Liu J., Kuang X., Liu N., Scofield V.L., Voorhees J.R., Reid A.J., Yan M., Lynn W.S., Wong PK. Activation of transcription factor Nrf-2 and its downstream targets in response to moloney murine leukemia virus ts1-induced thiol depletion and oxidative stress in astrocytes // J. Virol., 2004. Vol. 78(21). P. 11926–11938.
18. Направленная иммунокорекция: проблемы и перспективы. Под ред. М.Т. Абидова (Приложение 3 к журналу «Бюллетень экспериментальной биологии и медицины» за 2000 г.). М.: Изд-во РАМН, 2000. 104 с.
19. Schumann S., Kaiser A., Nicoletti F., Mangano K., Fagone P., van Wijk E., Yan Y., Schulz P., Ludescher B., Niedermaier M., von Wegerer J., Rauch P., Setz C., Schubert U., Brysch W. Immune-Modulating Drug MP1032 with SARS-CoV-2 Antiviral Activity In Vitro: A potential Multi-Target Approach for Prevention and Early Intervention Treatment of COVID-19 // International Journal of Molecular Sciences., 2020. 21(22). P. 8803.
20. Интернет-ресурс https://www.bachpharma.com/science/
21. Интернет-ресурс https://clinicaltrials.gov/ct2/show/record/NCT02908347
22. Kohman R.A., Rhodes J.S. Neurogenesis, inflammation and behavior // Brain, Behavior, and Immunity., 2013. Vol. 27. P. 22-32.
23. Jenrow K.A., Brown S.L., Lapanowski K., Naei H., Kolozsvary A., Kim J.H., Selective inhibition of microglia-mediated neuroinflammation mitigates radiation-induced cognitive impairment // Radiat. Res., 2013. 179. P 549-556.
24. Shetty A.K., Attaluri S., Kodali M., Shuai B., Shetty G.A., Upadhya D., Hattiangady B., Madhu L.N., Upadhya R., Bates A., Rao X. Monosodium luminol reinstates redox homeostasis, improves cognition, mood and neurogenesis, and alleviates neuro- and systemic inflammation in a model of Gulf War Illness / Redox biology., 2020. 28. P. 1013-1089.
25. Jiang Y., Scofield V.L., Yan M., Qiang W., Liu N., Reid A.J., Lynn W.S., Wong P.K. Retrovirus-induced oxidative stress with neuroimmunodegeneration is suppressed by antioxidant treatment with a refined monosodium alpha-luminol (Galavit) // J Virol., 2006. 80(9). P. 4557-4569.



УДК 615.471

РАЗРАБОТКА ГЕНЕРАТОРА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ГАЗОВОЙ ПЛАЗМЫ ДЛЯ МЕДИЦИНСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВА ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КАК ЭФФЕКТИВНОГО СТЕРИЛИЗАТОРА И АКТИВАТОРА РАНОЗАЖИВЛЕНИЯ В ПОЛЕВЫХ И СТАЦИОНАРНЫХ УСЛОВИЯХ В МЕДИЦИНСКОЙ СЛУЖБЕ АРМИИ РФ[1]

DEVELOPMENT OF A LOW-TEMPERATURE GAS PLASMA GENERATOR FOR MEDICAL USE AND THE PROSPECT OF ITS USE AS AN EFFECTIVE STERILIZER AND ACTIVATOR OF WOUND HEALING IN FIELD AND STATIONARY CONDITIONS IN THE MEDICAL SERVICE OF THE RUSSIAN ARMY

Александр Вадимович Лазукин
инженер
ФГБОУ ВО Национальный исследовательский университет «МЭИ»
кафедра техники и электрофизики высоких напряжений
Адрес: 111250, Москва, Красноказарменная ул., д. 14
Тел. +7 (495) 362-76-60
E-mail: lazukin_av@mail.ru

Артем Михайлович Ермаков
кандидат биологических наук
ведущий научный сотрудник
Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН
заместитель начальника отдела контроля фармацевтической службы качества
МОУ «ИИФ»
старший научный сотрудник
Больница Пущинского научного центра РАН
Адрес: 142290, Московская обл., г. Пущино, ул. Институтская, д. 3
Тел. +7 (4967) 73-94-28
E-mail: ao_ermakovy@rambler.ru

Вера Александровна Афанасьева
старший лаборант-исследователь
Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН
младший научный сотрудник
Больница Пущинского научного центра РАН
Адрес: 142290, Московская обл., г. Пущино, ул. Институтская, д. 3
Тел. +7 (4967) 73-94-28
E-mail: va_vera_afanaseva@mail.ru

Аннотация
В статье обсуждается перспективная технология стерилизации и активации ранозаживления с помощью низкотемпературной газовой плазмы. В рамках проекта, на основе отечественных технологий разрабатывается генератор низкотемпературной газовой плазмы, который может применяться как в стационарах, так и мобильных системах и в полевых условиях. Описываются характеристики создаваемого отечественного генератора, а также первичные экспериментальные данные, которые показывают высокую бактерицидную активность низкотемпературной газовой плазмы, создаваемой макетом генератора.
Ключевые слова: низкотемпературная газовая плазма, генератор низкотемпературной газовой плазмы, стерилизация, коагуляция, активация ранозаживления.

Summary
The article discusses a promising technology of sterilization and activation of wound healing using low-temperature gas plasma. Within the framework of the project, a low-temperature gas plasma generator is being developed on the basis of domestic technologies, which can be used both in hospitals and mobile systems and in the field. The characteristics of the generator being created are described, as well as primary experimental data that show high bactericidal activity of low-temperature gas plasma created by the generator.
Keywords: low-temperature gas plasma, low-temperature gas plasma generator, sterilization, coagulation, activation of wound healing.

В настоящее время наблюдается значительное увеличение частоты поражения ран, язв и трофически несостоятельных тканей патогенной полирезистентной микрофлорой, представляющей смертельную опасность для больного человека [1]. Во всех странах, и, в первую очередь, в высокоразвитых, благодаря успехам развития фармацевтической индустрии, постоянно увеличивается диапазон химических средств и антибиотиков, обладающих широким спектром действия. Они способны не только оказывать биоцидное действие в отношении разнообраз-

[1] Работа выполнена при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования НИОКТР 26/03/2020 № 075-01406-20-01. Тема 0576-2020-0001.

ной раневой инфекции, но и приводить к развитию множества нежелательных побочных, повреждающих, аллергических и других реакций непереносимости, а также подавлять иммунитет макроорганизма [2,3]. Под воздействием новых, как правило, более активных и высоко токсичных антимикробных средств появляются новые штаммы и виды микроорганизмов и нанобактерий, представляющих наряду со спорами одну из наиболее устойчивых форм микроорганизмов. В результате прогрессивно развивается и распространяется полирезистентная жизненно опасная раневая инфекция [3].

В настоящее время для уничтожения микрофлоры с множественной устойчивостью к антибиотикам активно внедряется метод стерилизации с помощью низкотемпературной газовой плазмы (НГП) [4]. Первоначально НГП применялась для уничтожения микроорганизмов на поверхности инструментария, приборов и материалов, не переносящих тепловую и радиационную стерилизацию. Широкое распространение получили плазменные скальпели и коагуляторы, при действии которых одновременно происходит стерилизация [5]. При противомикробном использовании НГП привлекает универсальность воздействия, так как уничтожается любая микрофлора: бактерии, споры, грибы, вирусы, простейшие, внутриклеточные микроорганизмы [6-9]. Становятся невозможными селекция и мутации микроорганизмов, неизбежно способствующие появлению более резистентной микрофлоры. Стоит отметить, что в недавних исследованиях было показано, что НГП успешно уничтожает на любых поверхностях возбудителя новой коронавирусной инфекции – вирус SARS-CoV-2 [10].

Выявленный спектр биологической активности холодной плазмы ставит ее в ряд прорывных высокотехнологичных средств биомедицинского назначения. Использование низкотемпературной газовой плазмы открывает новые перспективы лечения инфицированных полирезистентной микрофлорой хронически незаживающих ран и язв в гнойной хирургии, гинекологии, стоматологии, челюстно-лицевой хирургии, косметологии и дерматологии, в ангиологии при облитерирующих поражениях сосудов, возрастных трофических нарушениях и ослаблении иммунитета, способствующих образованию трофических ран и язв, инфицированных множественной микрофлорой. Возможно, применение низкотемпературной плазмы будет дополнительным инструментом лечения при вторичном иммунодефиците и ослаблении регенераторного потенциала организма. Применение портативных медицинских плазмагенераторов будет актуально в медицинской службе войск особенно в период боевых действий, когда в полевых условиях необходимо проведение процедур стерилизации, остановки кровотечения и активации ранозаживления.

В настоящее время в России отсутствуют подобного рода медицинские устройства, поэтому на базе Больницы Пущинского научного центра РАН, совместно с сотрудниками ИТЭБ РАН (г. Пущино) и МОУ «ИИФ» (г. Серпухов) по гранту Министерства науки и высшего образования (тема 0576-2020-0001) разрабатывается и изготавливается опытный образец портативного генератора НГП для медицинского применения. В ходе работ будет разработан и оптимизирован для применения в практическом здравоохранении и биотехнологии оригинальный портативный генератор низкотемпературной газовой плазмы, обеспечивающий реализацию различных режимов плазменного облучения от стерилизации приборов, оборудования и инструментов, дезинфекции инфицированных разнообразной полирезистентной микрофлорой поврежденных тканей до ускорения процессов регенерации и заживления ран и язв. Преимуществом разрабатываемого генератора низкотемпературной газовой плазмы является возможность использования для создания низкотемпературной плазмы различных газов – гелия, аргона, ксенона и их смеси с воздухом, азотом или кислородом. Предлагаемая разработка не имеет аналогов. За рубежом созданы образцы стационарных плазмагенераторов (SteriPlas фирмы Adtec, Япония-Германия) для дезинфекции инфицированных ран – этот прибор разрешен для клинического применения в ряде стран ЕС, но он не мобилен и может использоваться только в стационарных условиях [11].

В оригинальном плазмагенераторе будет использован принцип генерации разряда с помощью высокочастотных токов и это обеспечит возможность значительно снизить габариты прибора и обеспечить импортозамещение дорогостоящего оборудования. Разрабатываемый прибор будет иметь модульную конструкцию для возможности облучения как точечной поверхности, так и обширной площади до нескольких десятков см^2. Плазменная технология лечения может быть использована в стационарных, полевых и домашних условия. Низкотемпературная газовая плазма позволит уничтожать все известные микроорганизмы, в том числе устойчивые к метициллину стафилококки (MRSA), вирусы и устойчивые микробные биопленки. Селективность биологического ответа на воздей-

ствие низкотемпературной газовой плазмы способствует тому, что уничтожающее микрофлору облучение не будет повреждать здоровые ткани человека и животных. Разработанный прибор позволит производить: быструю тотальную стерилизацию (в течение 5-10 мин.) на регулируемой площади медицинских инструментов и любых поверхностей из органических и не- органических материалов в стационарных и полевых условиях; быструю (в течение 5-10 мин.) тотальную стерилизацию ран и повреждений как поверхностных, так и глубоких ран на регулируемой площади, а также активировать иммунный ответ; помимо стерилизации существенно увеличивать скорость заживления ран и регенерацию тканей (предположительно время заживления сократится в 1,5-2 раза); коагуляцию крови, спекать капилляры и кровеносные сосуды при небольшом увеличении мощности и дозы облучения низкотемпературной газовой плазмы, что позволит значительно сократить кровопотерю и уменьшить вероятность смертности при сильном кровотечении в первый час после травмы.

Предполагается разработка базового модуля, в котором будут сменные модули с различной апертурой и площадью обрабатываемой поверхности для реализации различных приложений прибора – медицинский стационар и полевые условия (коагуляция, спекание, стерилизация и активация регенерации), стерилизация медицинских инструментов, стоматологические установки, косметологические установки, устройства для применения в быту (стерилизация воздуха, поверхностей, рук). В настоящее время был изготовлен макет устройства и проведена серия биологических испытаний на культурах бактерий *E. coli*. Как показано на *рисунке 1*, достаточно

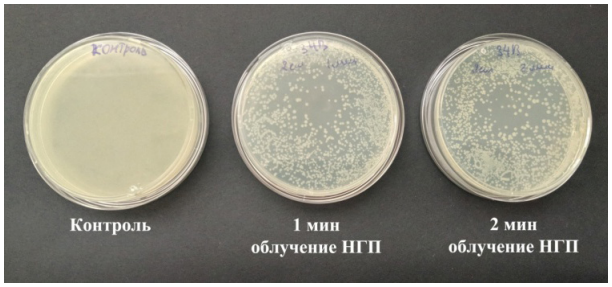


Рис. 1. Воздействие потока низкотемпературной газовой плазмы (газ – аргон) на рост бактериальной культуры кишечной палочки (*E. coli*) in vitro. На рисунке показаны чашки Петри с газонами бактерий. Контрольная чашка не подвергалась облучению (сплошной газон бактерий), далее чашки после облучения НГП в течение 1 мин и 2 мин. Наблюдается значительное снижение числа колоний бактерий после облучения на фоне контроля

небольшое по длительности облучение приводит к значительной гибели бактерий как в зоне облучения НГП, так и на периферии.

Таким образом, разрабатываемый нами генератор низкотемпературной газовой плазмы может быть успешно применен в качестве медицинского прибора, использующего биологические эффекты ионизированного газа для стерилизации и борьбы с патогенной микрофлорой на любых типах поверхностей, а также для лечения ран и язв, как в гражданских, так и военных медицинских учреждениях.

Литература

1. Tzaneva V, Mladenova I, Todorova G, Petkov D. Antibiotic treatment and resistance in chronic wounds of vascular origin. Clujul Med. 2016; 89(3): 365-370.
2. Brown E.D., Wright G.D. Antibacterial drug discovery in the resistance era. Nature 2016; 529(27): 336-43.
3. Landecker H. Antibiotic resistance and the biology of history. Body Sci. 2016; 22(4): 19-52.
4. Fiebrandt M., Lackmann J.-W., Stapelmann K. From patent to product? 50 years of low-pressure plasma sterilization. Plasma Process. Polym. 2018, 15, 1800139.
5. Izadjoo M., Zack S., Kim H., Skiba J. Medical applications of cold atmospheric plasma: State of the science. J. Wound Care 2018, 27, S4-S10.
6. Graves D.B. Low temperature plasma biomedicine: A tutorial review. Phys. Plasmas 2014, 21, 080901, doi:10.1063/ 1.4892534.
7. Bekeschus S., Schmidt A., Weltmann K.-D., von Woedtke T. The plasma jet kINPen – A powerful tool for wound healing. Clin. Plasma Med. 2016, 4, 19-28, doi:10.1016/j.cpme.2016.01.001.
8. Metelmann H.-R., Seebauer C., Miller V., Fridman A., Bauer G., Graves D.B., Pouvesle J.-M., Rutkowski R., Schuster M., Bekeschus S., et al. Clinical experience with cold plasma in the treatment of locally advanced head and neck cancer. Clin. Plasma Med. 2018, 9, 6–13, doi:10.1016/ j.cpme.2017.09.001.
9. Rutkowski R., Daeschlein G., Von Woedtke T., Smeets R., Gosau M., Metelmann H.-R. Long-Term Risk Assessment for Medical Application of Cold Atmospheric Pressure Plasma. Diagnostics 2020, 10, 210.
10. Chen Z., Garcia Jr G., Arumugaswami V., Wirz R.E., Cold atmospheric plasma for SARS-CoV-2 inactivation, Physics of Fluids 32(11) (2020) 111702.
11. Интернет-ресурс https://adtechealthcare.com/adtec-steriplas/

УДК 65.011, 005

К ВОПРОСУ ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ СОДЕРЖАНИЯ И СТРУКТУРЫ НАУЧНЫХ КОМПЕТЕНЦИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫХ НАУЧНЫХ ЦЕНТРОВ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ON THE ISSUE OF DETERMINING THE CONTENT AND STRUCTURE OF SCIENTIFIC COMPETENCIES OF STATE RESEARCH CENTERS OF THE RUSSIAN FEDERATION

Владимир Петрович Карулин
заслуженный работник высшей школы РФ
доктор технических наук, профессор
ведущий научный сотрудник
ФГБНУ «Госметодцентр»
Адрес: 115093, Москва, ул. Люсиновская, д.51
Тел.: +7 (499) 706-81-25
E-mail: kvp-1948@mail.ru

Юрий Анатольевич Сытняк
кандидат технических наук, доцент
начальник отдела
ФГБНУ «Госметодцентр»
Адрес: 115093, Москва, ул. Люсиновская, д. 51
Тел.:+7(499)706-81-25
E-mail: sytnyak@list.ru

Юлия Владимировна Аляева
кандидат технических наук
заместитель начальника отдела
ФГБНУ «Госметодцентр»
доцент НИУ «Московский энергетический институт»
Адрес: 115093, Москва, ул. Люсиновская, д. 51
Тел.:+7(499)706-81-25
E-mail: julaliaev@gmail.com

Аннотация

Решение задач, стоящих сегодня перед государственными научными центрами (ГНЦ), и особенно реализация перспективных научно-технологических направлений в большой степени зависит от состава и уровня научных компетенций ГНЦ по отдельным направлениям исследований и научным специальностям. В настоящее время существует проблема недостаточной полноты знаний о составе и содержании компетенций организаций, выполняющих научные исследования. В статье предложен подход к определению научных компетенций ГНЦ как системно организованной совокупности знаний, научных кадров и оборудования, возможностей разработки и продвижения РИД и технологий, результатов НИР, обеспечивающих эффективную реализацию функций ГНЦ.

Ключевые слова: государственные научные центры РФ, компетенции, научные исследования, реализация функций, показатели деятельности, эффективность.

Summary

The solution of the problems facing state research centers (SRC) today, and especially the implementation of promising scientific and technological directions, largely depends on the composition and level of scientific competencies of SRC in certain areas of research and scientific specialties. Currently, there is a problem of insufficient knowledge about the composition and content of the competencies of organizations carrying out scientific research. The article proposes an approach to the definition of scientific competencies of the SRC as a systemically organized set of knowledge, scientific personnel and equipment, opportunities for the development and promotion of results or intellectual activity and technologies, research results that ensure the effective implementation of the functions of the SRC.

Keywords: State scientific centers of the Russian Federation, competencies, research, implementation of functions, performance indicators, efficiency.

Введение

Государственные научные центры Российской Федерации (далее – ГНЦ) имеют мощный научно-технологический потенциал проведения фундаментальных, поисковых, прикладных исследований и экспериментальных разработок в реальных секторах экономики в различных регионах страны. ГНЦ располагают уникальным опытно-экспериментальным оборудованием и научными установками, опытными научными работниками и специалистами высокой квалификации, получившими международное признание за свою научную и научно-техническую деятельность.

Значимой является роль государственных научных центров Российской Федерации в реализации национальных проектов «Наука», «Наука и университеты», государственной про-

граммы Российской Федерации «Научно-технологическое развитие Российской Федерации», направленной на реализации приоритетов научно-технологического развития Российской Федерации [1-3].

В системе ГНЦ успешно решается задача формирования целостной системы подготовки и профессионального роста научных и научно-педагогических кадров на основе тесного сотрудничества с национальными исследовательскими университетами, федеральными, техническими университетами, другими высшими учебными заведениями.

Результаты деятельности ГНЦ [4] по проведению исследований и разработок (ИиР), направленных на реализацию приоритетов научно-технологического развития РФ и использование результатов интеллектуальной деятельности (РИД) для создания технологий и инновационной продукции, являются катализатором научно-технологического развития, как отдельных отраслей экономики, так и многих регионов Российской Федерации.

Содержание и структура научных компетенций государственных научных центров Российской Федерации

Сегодня система ГНЦ объединяет 45 научных организаций и является связующим звеном между фундаментальной наукой, прикладными исследованиями, образованием и реальным сектором экономики. ГНЦ работают по всем направлениям исследований в областях «Техника и технологии», «Естественные и точные науки» и «Медицинские науки и общественное здравоохранение».

Решение задач, стоящих сегодня перед ГНЦ, и особенно реализация перспективных научно-технологических направлений в большой степени зависит от состава и уровня научных компетенций ГНЦ по отдельным направлениям исследований и научным специальностям.

В настоящее время существует проблема недостаточной полноты знаний о составе и содержании компетенций организаций, выполняющих научные исследования.

Решением данной проблемы может стать единая база данных научных компетенций, позволяющая их ранжировать по уровню развития и перспективности достижения инновационных результатов, дающая представление не только о направлениях научных исследований, но и о достижимом уровне результатов НИР, кадровом и материальном обеспечении [5]. Сформированная база научных компетенций позволит потенциальным заказчикам получать информацию о возможности проведения научных исследований в организациях, институтам развития устанавливать приоритеты инфраструктурной поддержки инновационной деятельности с учетом имеющихся возможностей у разработчиков научной продукции, а органам исполнительной власти использовать информацию для принятия обоснованных управленческих решений по научному и инновационному развитию РФ.

Если говорить детально о смысловом содержании компетенции, следует отметить, что существует ряд определений этого понятия, которые сводятся к обеспечению ***способности*** организаций выполнять поставленные задачи или осуществлять определенную деятельность.

В качестве примера можно привести наиболее полное определение: компетенция – это набор взаимосвязанных знаний, навыков (подтвержденного опыта), способностей и технологий (включая научное оборудование), обеспечивающий компании эффективное решение технологических задач [6].

Основываясь на проведенном понятийном анализе применительно к системе ГНЦ, дадим следующее определение понятия научные компетенции ГНЦ.

Научные компетенции ГНЦ – системно организованная совокупность знаний, научных кадров и оборудования, возможностей разработки и продвижения РИД и технологий, результатов НИР, обеспечивающих эффективную реализацию функций ГНЦ.

Следует отметить что, компетенция возникает на пересечении научных и предметных областей деятельности.

Рассматривая компетенции ГНЦ как структурно организованную взаимосвязь элементов, с учетом сформулированных целей системного анализа, выделим две подсистемы и соответствующие им структуры – функциональную и тематическую.

Функциональная структура ГНЦ определяется ресурсными возможностями формирования компетенций, инфраструктурными возможностями реализации научных составляющих компетенций, результатов НИР и технологий (например, по шкале уровня готовности технологий [7]) (*таблица 1*).

Тематическая структура ГНЦ определяется соотношением референтных групп (направлений исследований и разработок) ГНЦ с одной стороны и соответствующих им отраслей наук (научных специальностей) с другой (*рисунок 1*).

Существенная особенность тематической структуры научных компетенций заключается в отсутствии нормативно определенного строго

Таблица 1

Функциональная структура научных компетенций ГНЦ

Ресурсные возможности	Инфраструктурные возможности	Результаты НИР и уровня развития технологий
Уровень знаний	● Наличие научно-образовательных центров и центров коллективного пользования научным оборудованием ● Взаимодействие с научными центрами мирового уровня ● Международное сотрудничество	● Разработка и внедрение РИД ● Коммерциализация РИД ● Участие в реализации комплексных научно-технических проектов полного инновационного цикла, критических технологий ● Участие в работе технологических платформ и научных платформ медицинской науки
Состав научных кадров	● Система подготовки и профессионального роста научных и научно-педагогических кадров	● Создание творческих коллективов, нацеленных на реализацию результатов НИР, продвижение технологий
Состав оборудования	● Наличие уникального оборудования, в том числе класса «мегасайнс» ● Обновление приборной базы	● Продвижение технологий (повышение уровня готовности технологий) ● Трансфер технологий

однозначного соответствия содержания исследований и разработок с научными специальностями.

Референтные группы ГНЦ, а также направления исследований и разработок, определяются расширенным классификатором OECD (Organization for Economic Co-operation and Development), имеющим три уровня: области наук (1 уровень); обобщенные направления исследований и разработок, под которыми будем понимать референтные группы (2 уровень); детализированные направления исследований и разработок (3 уровень).

В отличие от направления исследований и разработок научные специальности, определяются номенклатурой научных специальностей РФ [8].

В этих условиях формирование тематической структуры научных компетенций требует дополнительного детального анализа содержательных сущностей рассматриваемых понятий.

Определяющей характеристикой содержания научных компетенций, является структурная взаимосвязь элементов тематической структуры: референтных групп, направлений исследований и разработок, отраслей науки, научных специальностей.

При этом важнейшим фактором, характеризующим реализацию научных компетенций ГНЦ, является наличие ресурсных возможностей, обеспечивающих необходимый уровень развития научных компетенций ГНЦ.

Структурное представление содержания научных компетенций с учетом особенностей основных взаимосвязей показано на *рисунке 2*.

Форма представления содержания научных компетенций одной референтной группы ГНЦ приведена в *таблице 2*.

Рассмотрим более подробно краткий информационный портрет 5 ГНЦ для определения содержание научных компетенций:

1. АО ВНИИНМ – «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара» (г. Москва).

2. ФГБУ «ИТЭФ» – Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт теоретической и экспериментальной физики имени А.И. Алиханова Национального исследователь-

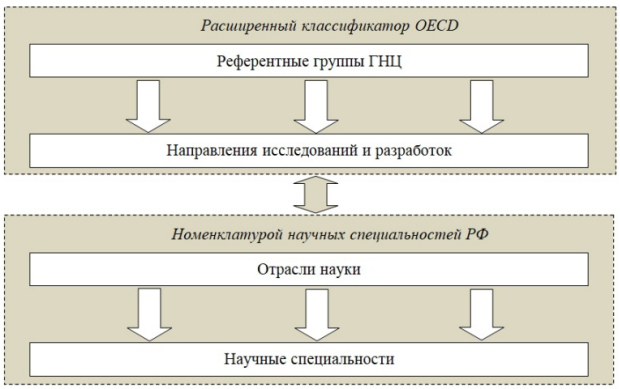


Рис. 1. Структура соотношения направлений исследований и разработок и научных специальностей

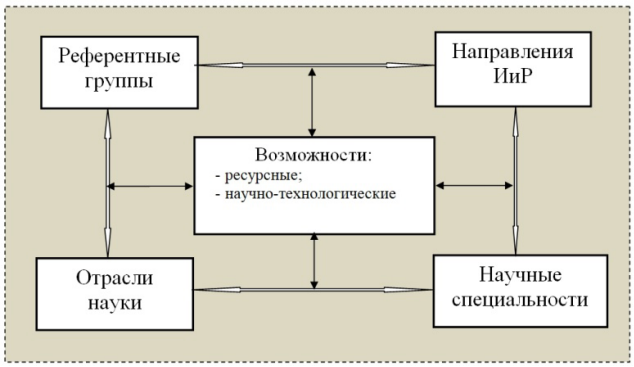


Рис. 2. Структурные характеристики содержания научных компетенций

Таблица 2

Содержание научных компетенций одной референтной группы ГНЦ

Референтная группа	*Отрасль науки 1*			…….		*Отрасль науки m*		
	Научная специальность - 1	*……*	*Научная специальность - n*			*Научная специальность - 1*		*Научная специальность. - n*
Направления исследований и разработок			V			V		
Направления исследований и разработок			V					V
……								
Направления исследований и разработок	V							V

Таблица 3

Пример референтных групп ГНЦ

ГНЦ	*Референтные группы*				
ВНИИНМ	Физика и астрономия	Механика и машиностроение	Химические науки	Нанотехнологии	Технологии материалов
ИТЭФ	Физика и астрономия	Механика и машиностроение			
ТРИНИТИ	Физика и астрономия	Механика и машиностроение			
ЦАГИ	Физика и астрономия	Механика и машиностроение	Математика		
ИФВЭ	Физика и астрономия	Механика и машиностроение			

ского центра «Курчатовский институт» (г. Москва).

3. АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» – Государственный научный центр Российской Федерации, Троицкий институт инновационных термоядерных исследований (г. Троицк, Московская область).

4. ФГУП «ЦАГИ» – Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н. Е. Жуковского (г. Жуковский, Московская область).

5. ФГБУ «ИФВЭ» – Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ) (г. Протвино, Московская область).

Все ГНЦ проводят научные исследования и разработки в рамках заявленных каждым ГНЦ референтных групп (*таблица 3*).

Рассматриваемые ГНЦ проводят исследования и разработки по направлениям, входящим в 5 референтных групп, причем отдельные ГНЦ ведут исследования в диапазоне от двух до пяти референтных групп.

При этом каждый ГНЦ концентрирует свою работу в рамках одной или двух отраслей науки (физико-математические, технические или химические науки) и от одной до трех научных специальностей.

Детальное распределение научных компетенций ГНЦ по направлениям исследований и разработок, отраслям науки и научным специальностям в референтной группе «Физика и астрономия» представлено в *таблице 4*.

Обобщенные количественные характеристика компетенций ГНЦ в референтной группе «Физика и астрономия» на выборке объемом 5 ГНЦ представлены в *таблицах 5-6*.

Таким образом, из анализа полученных данных, следует, что рассматриваемые ГНЦ обладают от 2 до 5 научными компетенциями в референтной группе «Физика и астрономия». При этом, общее количество компетенций для рассматриваемой группы ГНЦ в данной референтной группе равно 20 (1 – химическая компетенция, 13 – физико-математических компетенций и 6 – технических компетенций).

Заключение

На основе проведенного понятийного анализа применительно к системе ГНЦ РФ сформулировано определение понятия научные компетенции ГНЦ РФ. Научные компетенции ГНЦ

Таблица 4

Содержание научных компетенций ГНЦ в референтной группе «Физика и астрономия» на выборке объемом 5 ГНЦ

Референтная группа	*Отрасль науки*											
Физика и астрономия	***Химические науки***	***Физико-математические науки***							***Технические науки***			
Направления исследований и разработок	*Научные специальности*											
	2.6.8 – Технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов	1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики	1.3.3 - Теоретическая физика	1.3.15 - Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий	1.3.9 - Физика плазмы	1.3.19 - Лазерная физика	1.3.18 – Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника	1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы	2.6.8 – Технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов	1.3.19 - Лазерная физика	2.5.12 – Аэродинамика и процессы теплообмена летательных аппаратов	2.5.14– Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов
Акустика								ЦАГИ				
Астрономия и астрофизика		ИТЭФ										
Атомная, молекулярная и химическая физика	ВНИИНМ								ВНИИНМ			
Прикладная физика								ЦАГИ		ТРИНИТИ	ЦАГИ	ЦАГИ
Физика жидкости и плазмы					ТРИНИТИ							
Физика конденсированного состояния		ИТЭФ										
Физика элементарных частиц и квантовая теория поля			ИТЭФ ИФВЭ	ИТЭФ ИФВЭ			ИФВЭ					
Ядерная физика	ВНИИНМ			ИТЭФ ИФВЭ	ТРИНИТИ	ТРИНИТИ	ИФВЭ		ВНИИНМ	ТРИНИТИ		

Таблица 5

Обобщенная количественная характеристика компетенций ГНЦ в референтной группе «Физика и астрономия» на выборке объемом 5 ГНЦ

№ п/п	*ГНЦ*	*Научные ИиР*	*Научные специальности*	*Научные компетенции*
1	ВНИИНМ	2	1	2
2	ИТЭФ	4	3	5
3	ТРИНИТИ	3	3	5
4	ЦАГИ	2	3	4
5	ИФВЭ	2	3	5

Таблица 6

Общее количество компетенций ГНЦ в референтной группе «Физика и астрономия» на выборке объемом 5 ГНЦ

1	Количество химических компетенций	1
2	Количество физико-математических компетенций	13
3	Количество технических компетенций	6

РФ – системно организованная совокупность знаний, научных кадров и оборудования, возможностей разработки и продвижения РИД и технологий, результатов реализации НИР, обеспечивающих эффективную реализацию установленных функций ГНЦ.

Рассматривая компетенции ГНЦ как структурно организованную взаимосвязь элементов с учетом сформулированных целей системного анализа, выделены две подсистемы и соответствующие им структуры – функциональная и тематическая.

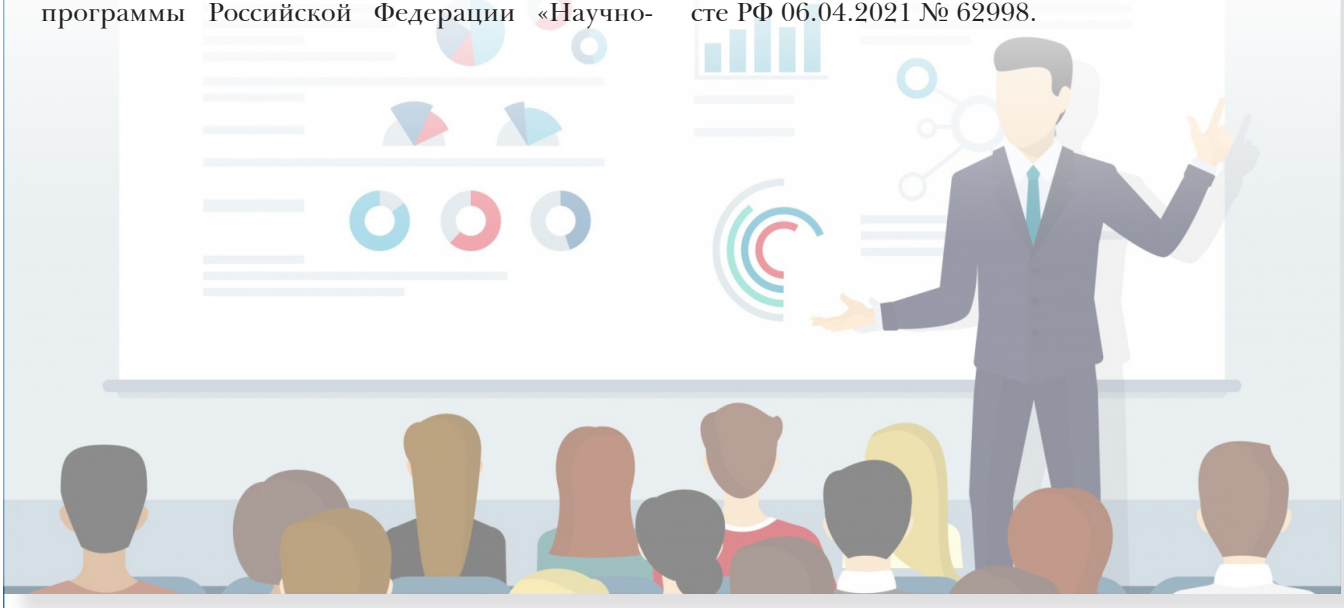
Функциональная структура ГНЦ определяется ресурсными возможностями формирования компетенций, инфраструктурными возможностями реализации научных составляющих компетенций, результатов НИР и технологий.

Определено, что базовой характеристикой содержания научных компетенций, является структурная взаимосвязь элементов *тематической структуры*: референтные группы, направления исследований и разработок, отрасли науки, научные специальности.

Детальное рассмотрение содержания научных компетенций по направлениям исследований и разработок, отраслям науки и научным специальностям проведено в референтной группе «Физика и астрономия» на примере пяти ГНЦ.

Литература

1. Медведев В.В., Поспехов Д.В., Аляева Ю.В. Роль государственных научных центров Российской Федерации в реализации национального проекта «Наука» // Известия Института инженерной физики, 2019. №4 (54). С.124-127.
2. Медведев В.В., Сытняк Ю.А., Поспехов Д.В. Роль государственных научных центров Российской Федерации в реализации государственной программы Российской Федерации «Научно-технологическое развитие Российской Федерации» // Известия Института инженерной физики, 2020. № 1(55). С.111-115.
3. Медведев В.В., Поспехов Д.В., Сытняк Ю.А. Роль государственных научных центров Российской Федерации в реализации приоритетов научно-технологического развития Российской Федерации // Известия Института инженерной физики, 2020. №2(56). С.95-100.
4. Аляева Ю.В., Емелин Н.М., Сытняк Ю.А. Аналитический обзор научной и научно-технической деятельности государственных научных центров Российской Федерации // Мониторинг. Наука и технологии, 2020. №1(43). С.93-98.
5. Горбунов Д.В., Соколов В.А. Методика оценки и ранжирования научных компетенций организаций в инновационной сфере (на примере Самарской области) // Вектор науки, 2014. №3(29). С.127-132.
6. Смирнов Е. Чем отличаются компетенция от компетентности: понятия, виды и классификация [Электронная публикация] / DELEN.RU – сайт о бизнесе и финансах. Дата публикации 2 февраля 2021 URL: https://delen.ru/biznes-slovar/kompetencija-i-kompetentnost.html.
7. ГОСТ Р 58048-2017 «Трансфер технологий. методические указания по оценке уровня зрелости технологий».
8. Приказ Министерства образования и науки РФ от 24 февраля 2021 г. № 118 «Об утверждении номенклатуры научных специальностей, по которым присуждаются ученые степени, и внесении изменения в Положение о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, ученой степени доктора наук, утвержденное приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 10 ноября 2017 г. № 1093». Зарегистрировано в Минюсте РФ 06.04.2021 № 62998.



УДК 65.012

ПОКАЗАТЕЛИ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ГОСУДАРСТВЕННЫХ НАУЧНЫХ ЦЕНТРОВ КАК ЭЛЕМЕНТЫ ПРИСВОЕНИЯ (ПОДТВЕРЖДЕНИЯ) ИХ СТАТУСА

PERFORMANCE INDICATORS OF STATE RESEARCH CENTERS AS ELEMENTS OF ASSIGNMENT (CONFIRMATION) OF THEIR STATUS

Николай Михайлович Емелин
заслуженный деятель науки и техники РСФСР
доктор технических наук, профессор
главный научный сотрудник
ФГБНУ «Госметодцентр»
Адрес: 115093, Москва, ул. Люсиновская, д. 51
Тел.:+7 (499) 706-81-24
E-mail: nme47@mail.ru

Аннотация
Построение формальной модели защищенности объекта требует анализа событий, с ним происходящих. Данная работа посвящена исследованию структур этих сложных событий, которые естественно организуются в сценарии. Рассмотрены структуры сценариев и методы их построения (сценарный подход).
Ключевые слова: защищенность объекта, структура событий, сценарный подход, декомпозиция.

Summary
The construction of a formal model of the security of an object requires an analysis of the events that occur with it. This work is devoted to the study of the structures of these complex events, which are naturally organized in the scenario. The structure of scenarios and methods of their construction (scenario approach) are considered.
Keywords: object security, structure of events, scenario approach, decomposition.

Рассматривая вопрос о показателях результативности деятельности государственных научных центров, прежде всего, будем отталкиваться от понятия «Государственный научный центр» (ГНЦ) и его основных функций.

Статус ГНЦ РФ может присваиваться расположенным на ее территории предприятиям, учреждениям и организациям науки, а также высшим учебным заведениям, имеющим уникальное опытно-экспериментальное оборудование и высококвалифицированные кадры, результаты научных исследований которых получили международное признание [1]. При этом ГНЦ РФ как научная организация по профилю «Разработчики технологий» должна быть отнесена к 1-й категории с учетом рекомендаций Межведомственной комиссии (МВК) по оценке результативности деятельности научных организаций, выполняющих научно-исследовательские, опытно-конструкторские и технологические работы гражданского назначения, утвержденной приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 10 апреля 2014 г. № 305.

К основным функциям ГНЦ можно отнести:

- проведение научных исследований и разработок, направленных на реализацию приоритетов научно-технологического развития Российской Федерации;
- участие в разработке и (или) реализации комплексных научно-технических программ и проектов полного
- создание и практическое применение новых технологий на основе использования результатов интеллектуальной деятельности;
- участие в создании и (или) обеспечении функционирования инфраструктуры научной, научно-технической и инновационной деятельности;
- осуществление экспертной деятельности, в том числе разработка прогнозов научно-техно-

логического развития, отраслевых документов стратегического планирования различных уровней, нормативно-технических и методических документов, информационных ресурсов для нужд отрасли.

На сегодняшний день при присвоении (подтверждении) статуса государственного научного центра количественно оцениваются только показатели, определяющие принадлежность ГНЦ к той или иной категории [2,3], а именно:

А – Количество публикаций, индексируемых в журналах WoS или Scopus, количество публикаций в российских журналах ядра РИНЦ (без WoS и Scopus) и количество опубликованных произведений из ядра РИНЦ в расчете на 100 научно-педагогических работников (НПР) по направлению *i*;

Б – Количество созданных результатов интеллектуальной деятельности (РИД), имеющих государственную регистрацию и (или) правовую охрану в РФ в расчете на 100 НПР по направлению *i*;

В2 – Объем доходов от использования РИД и совокупный доход малых инновационных предприятий (МИП) к общей численности работников, выполнявших исследования и разработки.

Определяющим для профиля II является показатель Б, дополнительными – показатели А и В2.

Использование трех вышеприведенных показателя (А, Б, В2) лишь частично позволяет судить о выполнении функций ГНЦ. Проведя анализ этих функций, представляется возможным несколько расширить перечень показателей результативности ГНЦ, учитывая специфику областей науки, в том числе и закрытых, характеризующих деятельность ГНЦ.

Начнем с направлений, по которым осуществляется присвоение (подтверждение) статуса ГНЦ: уникальное опытно-экспериментальное оборудование, высококвалифицированные кадры, результаты научных исследований, получивших международное признание.

Критерий 1. Использование уникального опытно-экспериментального оборудования.

Основной показатель:

О1 – Количество организаций-пользователей уникальным оборудованием организации (подтвержденные договорами), отнесенное к общему количеству уникального оборудования организации.

Дополнительные показатели:

Д1 – Доля пользователей уникальным оборудованием в численности исследователей (%).

Д2 – Доля фактического времени работы уникального оборудования к максимально возможному времени работы за год (%).

Д3 – Доля фактического времени работы оборудования в интересах третьих лиц к фактическому времени работы уникального оборудования за год (%).

Критерий 2. Высококвалифицированные кадры.

Основной показатель:

О2 – Доля высококвалифицированных специалистов (кандидатов наук и докторов наук) в численности исследователей (%).

Дополнительные показатели:

Д4 – Доля исследователей в численности работников, выполнявших исследования и разработки (%) .

Д5 – Доля исследователей в возрасте до 39 лет в численности исследователей (%).

Критерий 3. Результаты научных исследований, получивших международное признание.

Основной показатель:

О3 – Количество созданных результатов интеллектуальной деятельности (РИД), имеющих государственную регистрацию и (или) правовую охрану в РФ и (или) за ее пределами в расчете на 100 исследователей (ед. / 100 чел.)

Дополнительные показатели:

Д6 – Сумма публикаций, индексируемых в журналах Web of Science и (или) Scopus, в рецензируемых научных изданиях, входящих в Перечень ВАК, монографий, а также в рецензируемых закрытых научных изданиях, **монографий, диссертаций, отчетов о научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах по заказам федеральных органов исполнительной власти и государственных корпораций** и работы, опубликованные в материалах международных, всероссийских, отраслевых и межведомственных конференций, в расчете на 100 исследователей (ед. / 100 чел.)

Д7 – Общее количество поддерживаемых патентов (свидетельств) в расчете на 100 исследователей (ед. / 100 чел.)

Д8 – Объем доходов от использования РИД к общей численности работников, выполнявших исследования и разработки (тыс.руб. / чел.)

Теперь перейдем к основным функциям ГНЦ.

Критерий 4. Проведение научных исследований и разработок.

Основной показатель:

О4 – Доля исследований и разработок, свя-

занных с реализацией критических технологий РФ, в общем объеме выполненных работ (%).

Дополнительные показатели:

Д9 – Общее количество секретов производства (ноу-хау), охраняемых в режиме коммерческой тайны, полученных в отчетный период в расчете на 100 исследователей (ед./ 100 чел.)

Д10 – Внутренние текущие затраты на научные исследования и разработки, отнесенные к численности исследователей (тыс. руб./ чел.).

Д11 – Доля внебюджетных источников финансирования в объеме всех источников финансирования (%).

Критерий 5. Участие в реализации комплексных научно-технических программ и проектов полного инновационного цикла.

Основной показатель:

О5 – Доля исследований и разработок, связанных с реализацией комплексных научно-технических программ и проектов полного инновационного цикла, в общем объеме выполненных работ (%).

Критерий 6. Создание и продвижение новых технологий.

Основной показатель:

О6 – Суммарное количество переходов по шкале уровней готовности технологий по всем продвигаемым технологиям, отнесенным к количеству технологий создаваемых и продвигаемых в организации (в отчетный период)

Критерий 7. Участие в создании и (или) обеспечении функционирования инфраструктуры научной, научно-технической и инновационной деятельности.

Основной показатель:

О7 – Стоимость основных средств и нематериальных активов в расчете на одного исследователя (фондовооруженность, тыс.руб. / чел.).

Дополнительные показатели:

Д12 – Стоимость машин и оборудования в расчете на одного исследователя (техновооруженность, тыс.руб. / чел.).

Д13 – Стоимость уникального оборудования в расчете на одного исследователя (тыс.руб. / чел.).

Критерий 8. Проведение экспертно-методических работ.

Основной показатель:

08 – Количество выполненных работ экспертного, прогнозно-аналитического, нормативно-методического характера, работ по стратегическим или программным документам, работ по созданию и поддержке информационных ресурсов отраслевого и федерального уровня (без учета собственных сайтов организаций), в расчете на 100 работников, выполнявших исследования и разработки.

Принятие Межведомственной комиссией решения о присвоении (подтверждении) статуса ГНЦ с учетом показателей их результативности невозможно без предварительного установления пороговых значений показателей и правил принятия решения. Проведенный анализ использования показателей результативности [3,4] показывает, что в качестве пороговых значений чаще всего принимаются медианные значения. Выполнение пороговых значений лежит в основе принятия решения о присвоении (подтверждении) статуса ГНЦ, но при этом правила принятия решения могут быть различными: от назначения определенного количества выполненных основных и дополнительных показателей до вычисления интегрального показателя с дальнейшей проверкой выполнения его порогового значения.

Литература

1. Указ Президента Российской Федерации от 22.06.1993 № 939 «О государственных научных центрах Российской Федерации».

2. Постановление Правительства от 8 апреля 2009 г. № 312 «Об оценке и мониторинге научных организаций, выполняющих научно-исследовательские, опытно-конструкторские и технологические работы гражданского назначения».

3. Протокол заседания Межведомственной комиссии по оценке результативности деятельности научных организаций от 18.07.2019.

4. Емелин Н.М. Системный анализ развития социально-экономических систем / Сборник трудов XXXIX Всероссийской НТК «Проблемы эффективности и безопасности функционирования сложных технических и информационных систем». Серпухов, 2020. Ч. 2. С.137-147.

AUTHORS

Afanasyeva Vera A. Senior research assistant Institute for Theoretical and Experimental Biophysics RAS junior researcher Hospital of the Pushchino Scientific Center of the RAS. Moscow reg., Pushchino, Institutskaya st., 3.

Ageev Anton V. Engineer tester of testing laboratory. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Aksenov Andrey V. Head of the Laboratory, Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Research Institute of Automation named after N.L. Dukhov» (VNIIA). Moscow, Sushchevskaya str., 22.

Al Rubei Mohammed. Postgraduate student of the department of radio Engineering and radio systems, VLSU. Vladimir, ul. Gorky, 87.

Alatortsev Alexey I. Doctor of Technical Sciences. Head of the department. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Alyaeva Yulia V. Candidate of Technical Sciences, Deputy Head of Department in FSBSI «The Federal Science and Methodical Center», assistant professor of National Research University «Moscow Power Engineering Institute». Moscow, Lyusinovskaya street, 51.

Berkovich Sergei B. Honorary Surveyor of the Russian Federation. Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Navigation and Geodetic Systems. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarnyuj l., 1a.

Bikmayev Ramil R. Head of the Department of Navigation and Geodetic Systems. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarnyuj l., 1a.

Butrina Elena P. Head of the LISZI group, Interregional Educational Institution. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarnyuj l., 1a.

Chernousov Maxim S. Adjunct. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forse. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

Chigray Anatoly G. Candidate of Technical Sciences. Leading researcher of the department. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Emelin Nikolay M. Honored Scientist of the RSFSR, Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of FSBSE «Gosmetodcentr». Moscow, Lyusinovskaya street, 51.

Ermakov Artem M. Candidate of biological sciences. Senior Researcher. Institute of Theoretical and Experimental Biophysics, Russian Academy of Sciences, Moscow reg., Pushchino, Institutskaya st., 3. Leading researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarnyu l., 1a.

Ermakova Olga N. Candidate of biological sciences. Researcher. Institute of Theoretical and Experimental Biophysics, Russian Academy of Sciences, Moscow reg., Pushchino, Institutskaya st., 3.

Frolov Pavel V. Graduate student, «Information Security» Department, Kaluga Branch of Bauman MSTU. Kaluga, St. Bazhenova, 2.

Furov Andrey N. Candidate of Technical Sciences. Senior lecturer. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya St., 17.

Grachev Dmitry V. Head of the Laboratory of the Federal State Budgetary Institution «27 Central Research Institute» of the Ministry of Defense of Russia. Moscow, 1st Horoshevsky proezd, 5.

Gribunin Vadim G. Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation. Doctor of Technical Science. Chief Researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Grishakin Vitaliy T. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Theoretical Mechanics of the Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI). Moscow, Leningradsky ave., 64.

Grishanenko Ruslan L. Officer.

Iskenderov Eldar G. PhD in Chemistry, Senior Researcher. Institute for geothermal and renewable energy problems – branch of the joint institute for high temperatures of the Russian Academy of Sciences. Republic of Dagestan, Makhachkala, prosp. I. Shamilya, 39a.

Kalyuzhnyy Alexander A. Postgraduate student of the department of radio Engineering and radio systems, VLSU. Vladimir, ul. Gorky, 87.

Karulin Vladimir P. Honored Worker of Higher School of the Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, Professor, Senior Researcher of FSBSE «Gosmetodcentr». Moscow, Lyusinovskaya st., 51.

Kazakov Rafael R. Candidate of Technical Sciences. Associate Professor of the Department of Onboard Information and Measuring complexes of spacecraft. Military Space Academy. A.F. Mozhaisky. St. Petersburg, ul. Zhdanovskaya, 13.

Khamatov Andrey A. Candidate of Technical Sciences, teacher of the Department of «Onboard information and measurement systems». Military Space Academy. A.F. Mozhaisky. St. Petersburg, ul. Zhdanovskaya, 13.

Kondakova Lyubov V. Junior Researcher. VA Strategic Missile Forces named after Peter the Great. Moscow reg., Balashikha, street Karbysheva, d. 8.

Korobkov Alexey A. Candidate of Technical Sciences, associate Professor, head of scientific and methodological Department. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Kotov Nikolay I. Honored Worker of Higher School of the Russian Federation. Excellence in Geodesy and Cartography of the Russian Federation. Candidate of Technical Sciences, Professor, Deputy Head of the Department of Navigation and Geodetic Systems. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Kulik Maksim V. Head of the Department of planning of scientific work and training of scientific and scientific-pedagogical personnel of the Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forse. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

AUTHORS

Kuprijanov Alexander I. Doctor of Technical Sciences, Professor. Professor. Moscow Aviation Institute (National Research University). Moscow, Volokolamsk Highway, 4.

Kuzin Evgeny N. Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher. VA Strategic Missile Forces named after Peter the Great. Moscow reg., Balashikha, street Karbysheva, d. 8.

Labaznikov Andrey P. Officer.

Lazukin Alexander V. Engineer FSBEI HE National Research University «MPEI» Department of High Voltage Engineering and Electrophysics. Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14.

Makhaev Alexander Y. Honored Worker of Geodesy and Cartography of the Russian Federation. Honorary Surveyor of the Russian Federation. Head of department - deputy head of department navigation and geodetic systems on topogeodetic and navigation support. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Mazin Anatoly V. Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of «Information Security», Kaluga Branch of Bauman MSTU. Kaluga, St. Bazhenova, 2.

Medvedeva Svetlana A. Graduate student. Department of Information Processing Systems., Kaluga Branch of Bauman MSTU. Kaluga, St. Bazhenova, 2.

Nakonechny Andrey B. Officer.

Obynochny Igor A. Candidate of Pedagogical Sciences, Deputy head of the Faculty – Head of the training unit. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya St., 17.

Oleinikov Vladimir P. Candidate of Physical and Mathematical Sciences, associate Professor. An expert LISZI. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Popov Alexey G. Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation. Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher. Head of the Department of Strength Studies and Technical Diagnostics. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarnyuj l., 1a.

Pozdnyakov Alexander D. Doctor of technical sciences, professor of the department of radio Engineering and radio systems, VLSU. Vladimir, ul. Gorky, 87.

Sadekova Al`fiya A. Junior Researcher NIO-1. Federal State Autonomous Institution «Military Innovation Technopolis «ERA». Krasnodar reg., Anapa, Pionersky pr., 41.

Sal'ko Andrey E. Doctor of Technical Sciences, Professor, Laureate of the prize of the government of the Russian Federation in the field of science and technology. Deputy Director General for science and technology policy and inter-structural communications. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Sergeev Stepan S. Head of engineering calculation group, Public Joint Stock Company «Cryogenmash». Moscow region, Balashikha, Lenin Ave., 67.

Shirokov Sergey E. Head of the 252nd laboratory of the Department of on-Board information and measurement systems. Military space Academy named after A.F. Mozhaiskiy. St. Petersburg, ul. Zhdanovskaya, 13.

Sholokhov Aleksei V. Doctor of Technical Sciences, Professor, leading researcher of the Department of Navigation and Geodetic Systems. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Smirnov Dmitriy V. Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, associate professor. Full member of the Academy of Engineering Sciences. Professor of the Department FSBEI of HE MAI (NRU). First Vice President of the Institute – Deputy Chairman of the Board of the Institute of Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Smorodin Anatoly I. Honorary worker of science and technology of the Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, Professor. Professor of the E-4 Department of the Moscow state technical University N. E. Bauman. Moscow, st. 2-nd Baumanskaya, d. 5.

Sytnyak Yuriy A. Candidate of Engineering Sciences. Head of the Scientific and Analytical Department of FSBSI «Gosmetodcentr». Moscow, Lyusinovskaya street, 51.

Timonov Andrey A. Officer.

Turkov Sergey S. Candidate of Technical Sciences, senior lecturer. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya St., 17.

Tzar'kov Alexey N. Honoured scientist of Russia, Doctor of Technical Sciences, professor. President of Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Tzar'kova Elena A. General director. Medical clinic «AxioMed». Moscow region, Serpukhov, 2nd Moskovskaya str., 6, building 5, room. 4a.

Umnikov Evgeny V. Leading engineer. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Vershinin Evgeny V. Candidate of Physical and Mathematical sciences, docent. Head of «Information processing systems» Department. Kaluga Branch of Bauman MSTU. Kaluga, St. Bazhenova, 2.

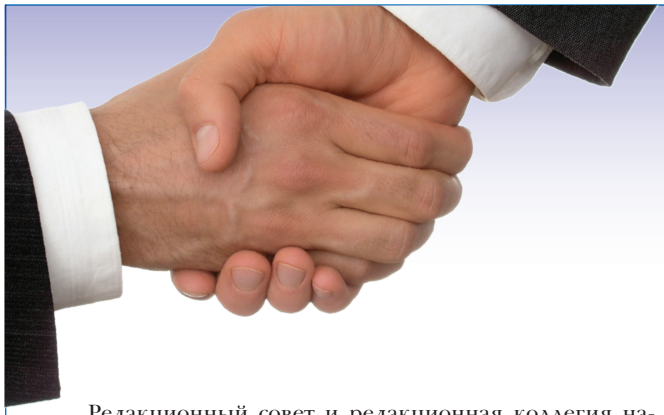
Volkov Gennadiy G. Doctor of physical and mathematical sciences, professor. Senior Researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

Zagarskih Vladimir I. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor. Senior Researcher. Military Academy of the Strategic Missile Forse. Moscow Reg., Balashikha, Karbysheva st., 8.

Zakharov Vladimir L. Doctor of Military Sciences, professor. Full member of the Academy of Military Sciences. Professor. FSBEI of HE MAI (NRU). Moscow, Volokolamsk Highway, 4.

Zelenevsky Vladimir V. Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation. Doctor of Technical Sciences, Professor, professor of the department. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forse. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

Zelenevsky Yury V. Doctor of Technical Sciences, associate professor. Researcher. Military Academy of the Strategic Missile Forse. Moscow Reg., Balashikha, Karbysheva st., 8.



ЭТИКА НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

Редакционный совет и редакционная коллегия научно-технического журнала «Известия Института инженерной физики» придерживаются принятых международным сообществом принципов публикационной этики, отраженных, в частности, в рекомендациях Комитета по этике научных публикаций (Committee on Publication Ethics).

Все статьи, предоставленные для публикации в журнале «Известия Института инженерной физики», проходят рецензирование на оригинальность, этичность и значимость. Соблюдение стандартов этического поведения важно для всех сторон, принимающих участие в публикации: авторов, редакторов журнала, рецензентов, издателя.

ОБЯЗАННОСТИ РЕДАКТОРА

Редактор в своей деятельности обязуется:

- постоянно совершенствовать журнал;
- следовать принципу свободы мнений;
- стремиться к удовлетворению потребностей читателей и авторов журнала;
- исключать влияние интересов бизнеса или политики на принятие решений об опубликовании материалов;
- принимать решения на основании принципа справедливости и беспристрастности, обеспечивать прозрачность редакционной деятельности на всех ее этапах;
- не раскрывать информацию о предоставленных материалах никому, кроме соответствующих авторов, рецензентов, других редакционных консультантов;
- оценивать рукописи исключительно по их научному содержанию;
- принимать решение о публикации материалов, руководствуясь следующими главными критериями: соответствие рукописи тематике журнала; актуальность, новизна и научная значимость представленной статьи; ясность изложения; достоверность результатов и законченность выводов. Качество исследования и его актуальность являются основой для решения о публикации;
- принимать меры для обеспечения высокого качества публикуемых материалов и защиты конфиденциальности персональной информации. При обнаружении содержательных, грамматических, стилистических и иных ошибок редакция обязуется предпринимать все меры для их устранения;
- обосновать свое решение в случае принятия или отклонения статьи;
- предоставить автору рецензируемого материала возможность для обоснования своей исследовательской позиции;
- поощрять дискуссии и предоставлять возможность для изложения точки зрения оппонентов;
- не использовать в собственных исследованиях информацию из неопубликованных материалов.

ОБЯЗАННОСТИ ЧЛЕНОВ РЕДСОВЕТА (РЕДКОЛЛЕГИИ)

Решение о публикации.

Редсовет (редколлегия) журнала «Известия Института инженерной физики» являются ответственными за принятие решения о том, какие статьи будут опубликованы в журнале. Решение принимается на основании представляемых на статью рецензий

Редсовет (редколлегия) придерживаются политики журнала и действуют в рамках законных требований, поскольку несут ответственность за нарушение авторских прав.

Конфиденциальность.

Рецензенты или кто-либо из сотрудников редакции не должны разглашать никакую информацию о предоставленной рукописи кому-либо, кроме самого автора, рецензентов, потенциальных рецензентов, членов редакционного совета (коллегии) и издателя, поскольку она является конфиденциальной.

Раскрытие информации и конфликт интересов.

Неопубликованные материалы, находящиеся в предоставленной статье, не должны быть использованы в собственном исследовании научного редактора и рецензентов без специального письменного разрешения автора.

ОБЯЗАННОСТИ РЕЦЕНЗЕНТОВ

Рецензенты оказывают помощь членам редакционного совета (редколлегии) при принятии редакционного решения, а также помогают автору усовершенствовать работу.

Конфиденциальность.

Любые рукописи, полученные для рецензирования, должны восприниматься как конфиденциальные документы. Они не могут быть показаны либо обговорены с другими лицами, кроме тех, которые уполномочены редакцией.

Подтверждение источников.

Рецензенты должны идентифицировать опубликованную работу, которая не была процитирована автором. Любое утверждение, что наблюдение, происхождение либо аргумент ранее были сообщены, необходимо сопровождать соответствующей ссылкой. Рецензент должен также донести до сведения редакции о любой существенной схожести или частичном совпадении между рукописью, которая рецензируется, и другой уже опубликованной работой, которая ему знакома.

Раскрытие информации и конфликт интересов.

Приватная информация или идеи, возникшие в процессе рецензирования, должны остаться конфиденциальными и не могут быть использованы в личных интересах. Рецензент не должен рассматривать рукопись, если имеет место конфликт интересов в результате его конкурентных, партнерских либо других отношений или связей с кем-либо из авторов, компаний или организаций, связанных с материалом публикации.

ОБЯЗАННОСТИ АВТОРОВ

Оригинальность и плагиат.

Авторы должны гарантировать, что они написали полностью оригинальную работу. Если авторы использовали работу и/или слова других авторов, это должно быть соответственно указано и процитировано.

Доступ к данным и сохранность.

Автор должен быть готов обеспечить доступ к данным, связанными с материалом публикации, если таковой возможен. Во всяком случае, автор должен быть готов сохранять такие данные на протяжении разумного периода времени после опубликования.

Многоразовая, избыточная или конкурирующая публикация.

Автор не должен публиковать работы, которые описывают по сути одно и то же исследование, более чем один раз или более чем в одном журнале.

Предоставление рукописи более чем в один журнал одновременно означает неэтичное издательское поведение и является недопустимым.

Подтверждение источников.
Необходимо предоставлять должное подтверждение работ других авторов. Авторы должны процитировать публикации, которые имели значение при создании заявленной работы.

Авторство материала.
Авторство необходимо ограничить теми лицами, которые внесли ощутимый вклад в концепцию, проект, исполнение или интерпретацию заявленной работы. Всех, кто внес ощутимый вклад, следует внести в список соавторов.

Автор должен гарантировать, что список авторов содержит только действительных авторов и в него не внесены те, кто не имеет отношения к данной работе, а также то, что все соавторы ознакомились и одобрили окончательную версию статьи и дали согласие на ее публикацию.

Раскрытие информации и конфликт интересов.
Все авторы должны сообщать, если в их работе имеется финансовый либо другой конфликт интересов, который может повлиять на результаты или интерпретацию их рукописи.

Ошибки в опубликованных работах.
Если автор обнаружит существенную ошибку или неточность в своей опубликованной работе, его обязанность – незамедлительно сообщить об этом в редакцию журнала или издателю и сотрудничать с редакцией при исправлении ошибок.

НАРУШЕНИЯ

При возникновении ситуации, связанной с нарушением публикационной этики со стороны редактора, автора или рецензента, требуется ее обязательное рассмотрение. Редакционный совет (редколлегия) обязана потребовать разъяснения, без привлечения лиц, которые могут иметь конфликт интересов с одной из сторон.

Если материал, содержащий значительные неточности, был опубликован, он должен быть незамедлительно исправлен в форме, доступной для читателей и систем индексирования.

ТРЕБОВАНИЯ К АВТОРАМ СТАТЕЙ

Для публикации принимаются статьи на русском языке. Рекомендуемый объем статьи – 0,2–0,4 п.л. (8000–16000 знаков).

Тексты должны быть представлены:
- в электронном виде (Word 2003). Иллюстративный материал (сложные формулы, рисунки, фотографии и т.д.) кроме размещения в тексте обязательно должны предоставляться отдельными файлами!
- на бумажном носителе формата А4.

Текст статьи должен быть набран через 1,5 интервала (гарнитура «Times New Roman»), кегль 14.

Простые символы и формулы не набирать в математическом редакторе!

Напечатанный текст должен иметь поля: верхнее и левое – 2,5 см, правое и нижнее – 2 см.

Вверху первой страницы статьи размещаются:
- рубрика журнала (см. *Приложение 1*);
- УДК;
- название статьи с переводом на английский язык;
- имя, отчество, фамилия автора (авторов), ученая степень, ученое звание, должность и место работы.

Список литературы (**Литература**) размещается в конце статьи.

После литературы помещаются:
- список ключевых слов, краткая аннотация (на русском и английском языках).

Завершает рукопись полная информация об авторе (авторах):
- ФИО;
- ученая степень, ученое звание, должность и место работы с переводом на английский язык;
- адрес места работы, контактные телефоны, электронный адрес (по желанию автора – домашний адрес и телефон).

Обращаем особое внимание на:
- точность и правильность библиографического оформления списка литературы (в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008);
- выверенность статьи в компьютерном наборе;
- полное соответствие файла на электронном носителе и бумажного варианта.

Редакционная коллегия оставляет за собой право на редактирование статей, при этом с точки зрения научного содержания авторский вариант сохраняется.

Статьи, не принятые к публикации, не возвращаются.
Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается!

Приложение 1

РУБРИКАЦИЯ ЖУРНАЛА «Известия Института инженерной физики»

Постоянные рубрики

- **Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы.**
- **Радиотехника и связь.**
- **Информатика, вычислительная техника и управление.**

Разовые рубрики

- **Техника специального назначения.**
- **Инновационные проекты.**
- **Техническое регулирование.**
- **Профессиональное образование.**
- **Искусственный интеллект и робототехника.**
- **Медицина и фармацевтика.**
- **Диагностические системы.**
- **Научные обзоры. Научные рецензии. Отзывы.**

В соответствии с Решением Межведомственной комиссии РФ по защите государственной тайны №69 от 26 февраля 2001 г., требованиями законов №5485-1 «О государственной тайне» от 21 июля 1993 г., №149-ФЗ «Об информации, информационных технологиях и защите информации» от 27 июля 2006 г. статьи для публикации принимаются только при наличии экспертного заключения с разрешением на открытое опубликование.

INTERREGIONAL PUBLIC INSTITUTION
"INSTITUTE OF ENGINEERING PHYSICS"
(SCIENTIFIC, EDUCATIONAL AND INDUSTRIAL INSTITUTION)

CONTENTS

INSTRUMENT MAKING, METROLOGY AND INFORMATION–MEASURING DEVICES AND SYSTEMS

Sal'ko A.E., Zagarskikh V.I., Kuzin E.N., Kondakova L.V.
Detonation translator with longitudinal channel 2

Zakharov V.L., Smirnov D.V., Khamatov A.A., Shirokov S.E.
Technology for diagnosing on-board spacecraft equipment during autonomous operation 6

Iskenderov E.G.
Experimental setup for studying the specific heat of melting of ice-containing mixtures 9

Berkovich S.B., Bikmayev R.R., Kotov N.I., Makhaev A.Y., Sholokhov A.V.
Experience in creating a complex of metrological support for high-precision measurements of azimuth 14

Korobkov A.A., Kulik M.V., Sadekova A.A., Sergeev S.S., Smorodin A.I.
Mathematical modeling of the cooling process of liquefied methane in a heat exchanger designed to cool cryogenic products before refueling the launch vehicle 20

Popov A.G., Ageev A.V.
On prediction of the remaining service life of high pressure vessels based on the results of technical diagnostics 25

Grishakin V.T.
Taking into account the unilateral nature of the connection of the additional support with a multi-span beam when identifying a moving load 28

Alatortsev A.I., Chigray A.G., Furov A.N.
Methodological approach to the assessment of the preservation of spacecraft under the influence of bodies of natural origin on them 33

Aksenov A.V., Obynochny I.A., Turkov S.S.
The method of measuring control of the connection circuits of devices that are not tested in operation, providing an increase in reliability in special military complexes 36

RADIO ENGINEERING AND COMMUNICATION

Kalyuzhnyy A.A., Al Rubei Mohammed, Pozdnyakov A.D.
Recovery of a periodic signal from a set number of coherent strobing points 39

Zelenevsky V.V., Chernousov M.S., Zelenevsky Y.V., Nakonechny A.B.
Efficiency of cascading data encoding with internal orthogonal sequences 44

Kuprijanov A.I.
Sighting noise jamming radio systems with broadband signals 47

INFORMATION SCIENCE, COMPUTING AND MANAGEMENT

Frolov P.V., Medvedeva S.A., Mazin A.V., Vershinin E.V.
Applying of combined multilevel analysis of network packages in intrusion detection systems 51

Butrina E.P., Oleinikov V.P.
Object security: event structures and scenario approach 55

Zakharov V.L., Smirnov D.V., Kazakov R.R.
Optimization of the composition of the orbital constellation of dual-purpose spacecraft 61

Gribunin V.G., Grishanenko R.L., Labaznikov A.P., Timonov A.A.
Machine learning systems security. Protected assets, vulnerabilities, intruder and threat model, attack taxonomy 65

Volkov G.G.
On the control of electron-nuclear-spin dynamics in NV centers 72

Umnikov E.V., Grachev D.V.
The structure of the information security system in the simulation of robotic complexes 81

MODERN MEDICINE AND PHARMACEUTICS

Ermakov A.M., Ermakova O.N., Tzar'kova E.A., Tsar'kov A.N.
Tameron – as a drug for the prevention and treatment of neuropsychological consequences of stress in military personnel 87

Ermakov A.M., Lazukin A.V., Afanasyeva V.A.
Development of a low-temperature gas plasma generator for medical use and the prospect of its use as an effective sterilizer and activator of wound healing in field and stationary conditions in the medical service of the Russian army 91

INNOVATIVE PROJECTS

Karulin V.P., Sytnyak Y.A., Alyaeva Y.V.
On the issue of determining the content and structure of scientific competencies of state research centers of the Russian Federation 94

SCIENTOMETRY

Emelin N.M.
Performance indicators of state research centers as elements of assignment (confirmation) of their status 100

AUTHORS 103
THE ETHICS OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS 105
REQUIREMENTS TO AUTHORS 106

Учредитель и издатель – МОУ «ИИФ». Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а

Подписной индекс: 59190
по каталогу «Урал-Пресс»

Адрес редакции: 142210, Московская обл., г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а.
Тел: +7(4967)35-31-93, 35-13-71
Факс: +7(4967)35-44-20 http://www.iifrf.ru
E-mail: info@iifmail.ru

Издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия. Свидетельство о регистрации СМИ ПИ №ФС77-26650 от 20 декабря 2006 г.
Отпечатано на полиграфической базе МОУ «ИИФ».
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а.
Подписано в печать 9.08.2021.
Дата выхода в свет 18.08.2021. Тираж 2000 экз. Цена свободная.
© Межрегиональное общественное учреждение «Институт инженерной физики» (ИИФ), 2021

Межрегиональное
общественное
учреждение

«Институт инженерной физики»

(МОУ «ИИФ»)

научное, образовательное
и производственное
учреждение

142210, Московская обл., г. Серпухов, Большой Ударный переулок, д. 1а
http://www.iifrf.ru e-mail:info@iifmail.ru
Тел.: +7(4967) 35-31-93, 35-13-71 факс: +7(4967) 35-44-20 моб.: +7 (499) 400-05-75